

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019

Bc. Tomáš Chaloupka



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE VYSOKORYCHLOSTNÍCH OPTICKÝCH DATOVÝCH PŘENOSŮ

SIMULATION OF HIGH-SPEED OPTICAL DATA TRANSMISSIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Chaloupka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tomáš Chaloupka

ID: 144024

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce nastudujte a popište simulační nástroje OptSim a PHOTOSS. Definujte jejich základní vlastnosti a jejich odlišnosti z pohledu využití pro simulace datových provozů v přístupových a metropolitních sítích. Výsledkem diplomové práce budou tři laboratorní úlohy s teoretickým rozбором problematiky, která umožní studentům danou problematiku pochopit z hlediska teoretických poznatků. Na základě teoretických poznatků budou studenti schopni vytvořit simulační model a vyhodnotit výsledky. Každá úloha bude realizována jak v prostředí OptSim, tak v prostředí PHOTOSS. Student se zaměří na vytvoření úlohy pro přístupovou síť, xWDM síť a síť s pokročilým modulačním formátem (např. vysokorychlostní 100G koherentní přenos dat). Dosažené výsledky diskutujte. Laboratorní úlohy budou obsahovat samostatný úkol, který nebude v řešení popsán, čímž budou ověřeny znalosti studentů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav a kol. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-29-5.

[2] BINH, Le Nguyen. Optical modulation: advanced techniques and applications in transmission systems and networks. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1498745239.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se věnuje porovnání simulačních nástrojů OptSim™ a PHOTOSS, které jsou využívány pro simulace datových provozů v přístupových a metropolitních sítích. Výsledkem práce jsou tři laboratorní úlohy a jejich teoretické základny, které studentům umožní pochopit principy práce v jednotlivých simulačních prostředích.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cvičení, OptSim™, PHOTOSS, PON, WDM, PM-QPSK

ABSTRACT

The aim of this master thesis is comparison of simulation tools OptSim™ and PHOTOSS which are used to create simulations of data traffics in access and metropolitan networks. The outcome of this thesis is three laboratory exercises and their theoretical bases which should explain the way of working in different simulation environments to students.

KEYWORDS

Exercises, OptSim™, PHOTOSS, PON, WDM, PM-QPSK

CHALOUPKA, Tomáš. *Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů*. Brno, 2019, 100 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Simulace vysokorychlostních optických datových přenosů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing.Tomášovi Horváthovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	14
1 Úvod do problematiky optických přenosů	15
1.1 Optický přenos	15
1.1.1 Optický systém	15
1.1.2 Druhy vysílačů	16
1.1.3 Druhy přijímačů (diod)	17
1.1.4 Druhy vláken	18
1.1.5 Vlivy ve vláknech	19
1.1.6 Kódování NRZ	20
1.1.7 Chybovost BER - bit error rate	21
1.1.8 Diagram oka	21
1.1.9 Modulační techniky	23
1.1.10 Technologie přenosu - WDM,TDM	28
1.2 AON, PON	30
1.2.1 AON - Aktivní optická síť	30
1.2.2 PON - Pasivní optická síť	31
1.2.3 Vývoj PON	31
1.2.4 GPON, GEAPON	32
1.2.5 XG-PON	34
1.2.6 NG-PON2	34
1.3 Simulační nástroje pro optické sítě	38
1.3.1 OptSim™	38
1.3.2 PHOTOSS	41
2 Vytvoření testovací topologie	45
2.1 OptSim™	45
2.1.1 Délka 1 km	46
2.1.2 Délka 10 km	47
2.1.3 Maximální délky stanovených parametrů	48
2.2 PHOTOSS	49
2.2.1 Délka 1 km	51
2.2.2 Délka 10 km	51
2.2.3 Maximální délky stanovených parametrů	52

3	Vyhodnocení výsledků testovací topologie	54
3.1	OptSim TM	54
3.2	PHOTOSS	54
3.3	Shrnutí	55
4	Návrh laboratorních úloh	56
4.1	Simulace přístupové sítě	56
4.1.1	Cíle úlohy	56
4.1.2	Teoretický úvod	56
4.1.3	Analýza výsledků	58
4.1.4	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim TM	61
4.1.5	Výsledky OptSim TM	62
4.1.6	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS	63
4.1.7	Výsledky PHOTOSS	65
4.1.8	Studentské rozšíření	66
4.1.9	Závěr úlohy	66
4.1.10	Otázky k úloze	66
4.2	Simulace transportní sítě	67
4.2.1	Cíle úlohy	67
4.2.2	Teoretický úvod	67
4.2.3	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim TM	70
4.2.4	Výsledky OptSim TM	71
4.2.5	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS	73
4.2.6	Výsledky PHOTOSS	75
4.2.7	Studentské rozšíření OptSim TM a PHOTOSS	76
4.2.8	Závěr úlohy	79
4.2.9	Otázky k úloze	79
4.3	Simulace koherentního přenosu (PM-QPSK)	80
4.3.1	Cíle úlohy	80
4.3.2	Teoretický úvod	80
4.3.3	Zadání a realizace úlohy v programu OptSim TM	82
4.3.4	Výsledky OptSim TM	85
4.3.5	Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS	88
4.3.6	Výsledky PHOTOSS	89
4.3.7	Závěr úlohy	91
4.3.8	Otázky k úloze	91
5	Závěr	92
	Literatura	93

Seznam symbolů, veličin a zkratk	96
Seznam příloh	99
A Obsah přiloženého CD	100

Seznam obrázků

1.1	Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1])	15
1.2	Struktura DFB laseru (Převzato a upraveno z [2])	16
1.3	Výstup z laserů vlnové délky (Převzato a upraveno z [2])	17
1.4	Jádra optických vláken (Převzato a upraveno z [1])	18
1.5	Zkreslení signálu PMD (Převzato a upraveno z [8])	20
1.6	Druhy NRZ (Převzato a upraveno z [9])	20
1.7	Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování)	22
1.8	Diagram oka (Zdroj: Převzato a upraveno z [16])	23
1.9	QPSK demodulátor (Zdroj: Převzato a upraveno z [10])	24
1.10	PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])	25
1.11	PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])	26
1.12	QAM modulátor (Zdroj: Převzato a upraveno z [15])	27
1.13	Průběhy signálů v modulátoru 1.12 (Zdroj: Převzato a upraveno z [15])	27
1.14	Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [17])	28
1.15	Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)	29
1.16	PON topologie (Vlastní zpracování dle [5, str. 52])	31
1.17	GTC rámec GPON (Upraveno dle: [22, str. 29])	34
1.18	Základní topologie NG-PON2 (Upraveno dle: [23, str. 17])	35
1.19	Nové schéma (Zdroj: Vlastní zpracování)	39
1.20	Tabulka voleb (Zdroj: Vlastní zpracování)	40
1.21	Parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)	40
1.22	Paleta v programu OptSim TM (Zdroj: Vlastní zpracování)	41
1.23	Nové schéma s parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)	43
1.24	Paleta v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	44
2.1	Testovací topologie (Zdroj: Vlastní zpracování)	45
2.2	Grafy pro topologií - začátek vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	46
2.3	Grafy pro topologií s 1 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	46
2.4	Grafy pro topologií s 10 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	47
2.5	Grafy pro topologií se 71 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	48
2.6	Testovací topologie v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	49
2.7	Grafy pro topologii - začátek vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	50
2.8	Grafy pro topologii s 1 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	51
2.9	Grafy pro topologii s 10 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	52

2.10 Grafy pro topologií se 22 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)	52
4.1 Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1])	56
4.2 PON topologie (Vlastní zpracování dle [5, str. 52])	57
4.3 Implementace OLT v OptSim TM	57
4.4 Implementace ONU v OptSim TM	58
4.5 Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování)	59
4.6 Topologie v úloze 1	61
4.7 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)	62
4.8 Výstupní signál oko a optické spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)	62
4.9 Topologie v programu PHOTOSS	63
4.10 Implementace OLT a ONU v PHOTOSS	63
4.11 Spuštění simulace v programu PHOTOSS	64
4.12 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)	65
4.13 Výstupní signál oko a spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)	65
4.14 Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [17])	67
4.15 Pásmo s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)	68
4.16 Jednotka vysílače	69
4.17 Jednotka přijímače	69
4.18 Topologie v úloze 2	70
4.19 Signálové porovnání na začátku a konci trasy pro frekvenci 193,2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)	71
4.20 Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.1 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)	71
4.21 Společné výstupní spektrum probe2	72
4.22 Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)	72
4.23 Vstupní a výstupní oko (Zdroj: Vlastní zpracování)	72
4.24 Implementace vysílače a přijímače kanálu v PHOTOSS	73
4.25 PHOTOSS topologie v úloze 2	74
4.26 Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)	75
4.27 Výstupní spektrum přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	75
4.28 Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	76
4.29 Topologie v úloze 2 – studentské rozšíření OptSim TM	77

4.30 Výstupní optické spektrum WDM OptSim TM (Zdroj: Vlastní zpracování)	77
4.31 Topologie v úloze 2 - studentské rozšíření PHOTOSS	78
4.32 Výstupní optické spektrum (Zdroj: Vlastní zpracování)	79
4.33 PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])	80
4.34 PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])	81
4.35 PM-QPSK modulátor OptSim TM	82
4.36 PM-QPSK demodulátor/přijímač OptSim TM	84
4.37 Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)	85
4.38 Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka na výstupu z přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	86
4.39 Spektrum a výkon na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	86
4.40 Konstelační diagramy na výstupu z vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	87
4.41 Spektrum a diagram oka na straně přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	87
4.42 PHOTOSS topologie v úloze 3	88
4.43 Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)	89
4.44 Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka před vstupem do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	89
4.45 Konstelační diagramy na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)	90
4.46 Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)	90

Seznam tabulek

1.1	Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování)	21
1.2	Tabulka kapacit modulačních formátů (Zdroj: [13]).	24
1.3	Tabulka PON specifikací (Převzato a upraveno z [21])	32
1.4	Tabulka útlumových tříd NG-PON2	36
1.5	Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru	37
4.1	Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování)	60

Úvod

Optický přenos je dnes nejoblíbenějším typem přenosu v produkčním prostředí hlavně kvůli malému útlumu, nízké zaručitelnosti, vysoké škálovatelnosti, a tím i možnosti zvyšovat přenosové rychlosti.

Hlavním cílem této diplomové práce je vytvoření laboratorních úloh v programech pro simulace optických systémů OptSim™ a PHOTOS. Tyto úlohy mají umožnit studentům pochopit problematiku přenosu dat v lokálních a metropolitních sítích. Pro splnění tohoto cíle je nutno vytvořit vlastní návrh přístupové sítě, vytvořit simulace v jednotlivých programech a následně porovnat rozdíly ve vytvořených simulacích.

První kapitola je úvodem do problematiky optického přenosu a základních parametrů, s kterými je možno se při stavbě optické trasy v simulačních programech setkat. Je zde vysvětlen princip optického systému, rozdíly vysílačů a přijímačů, druhy vláken a vlivy, které se mohou ve vláknech vyskytnout.

Druhá kapitola obsahuje návrh testovací topologie s přednastavenými parametry pro každý simulační program.

Ve třetí kapitole se nachází výsledky proběhlých simulací programů OptSim™ a PHOTOS a jejich vzájemné porovnání.

Čtvrtá kapitola je věnována návrhu laboratorních úloh, ve kterých mají studenti vyzkoušet použití simulačních programů na třech simulačních úlohách. V první úloze se studenti naučí orientovat v aplikačním prostředí za pomoci předem navržené jednoduché topologie, kterou studenti v programu vytvoří. Druhá úloha je rozšířením té první, protože studenti budou mít za úkol převést již vytvořenou topologii do WDM topologie a ve třetí úloze se studenti seznámí s fungováním PM-QPSK modulace.

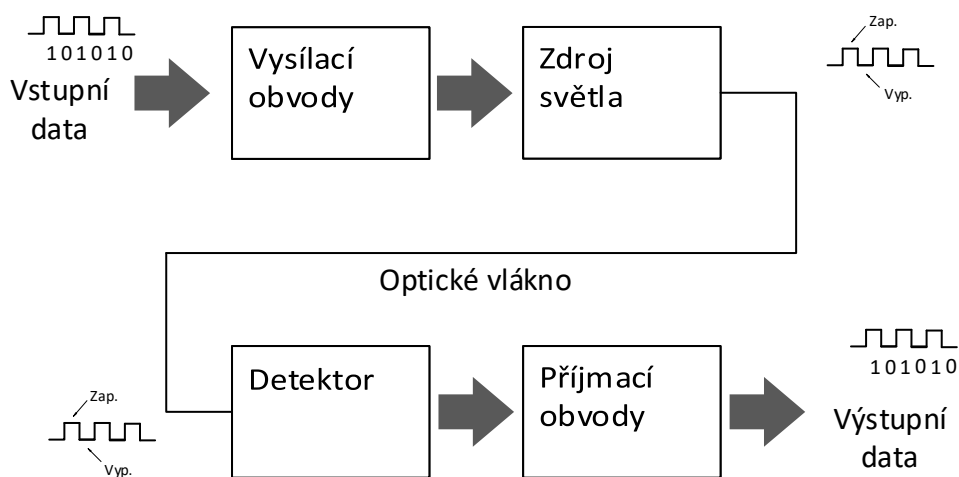
1 Úvod do problematiky optických přenosů

1.1 Optický přenos

V současné době je optický přenos stále častěji využíván pro přenos dat. Stává se nástupcem metalických vedení kvůli jeho účinnosti a vysoké přenosové kapacitě. Je trendem, že optické kabely nahrazují tradiční měděné kroucené dvojlinky nebo koaxiální kabely. Vzhledem k použití a poptávce po větší šířce pásma a rychlosti není pochyb o tom, že přenos skrze optická vlákna přinese více příležitostí a bude průběžně zkoumán a rozšířen tak, aby vyhovoval i budoucím požadavkům.

1.1.1 Optický systém

Optický komunikační systém většinou obsahuje tři hlavní komponenty: optický vysílač, vlákno pro přenos optického signálu a optický přijímač. Optický vysílač převádí elektrický signál na optický. Ten je vyslán po vlákne do přijímače, který překonvertuje optický signál na elektrický. Nejběžnější vysílače jsou LED nebo LD (laserové diody). Optická vlákna jsou použita jako médium pro telekomunikace kvůli jejich schopnosti vést signál na dlouhé vzdálenosti. Optický přijímač je tvořen optickým detektorem (fotodioda, fototranzistor), který za použití fotoelektrického jevu převádí světelný signál na elektrický.



Obr. 1.1: Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1])

1.1.2 Druhy vysílačů

Optické vysílače jsou základem optického přenosu. Dělíme je na skupiny dle vysílaného optického signálu:

- nekoherentní – LED diody,
- koherentní – lasery.

Diody LED jsou vhodné na kratší přenosy. Jejich výhodou je nenáročnost, dostupnost a lehká modulovatelnost. Jejich hlavní nevýhodou je malá modulační frekvence a malý výkon. Jsou vhodné na kratší přenosy.

Lasery

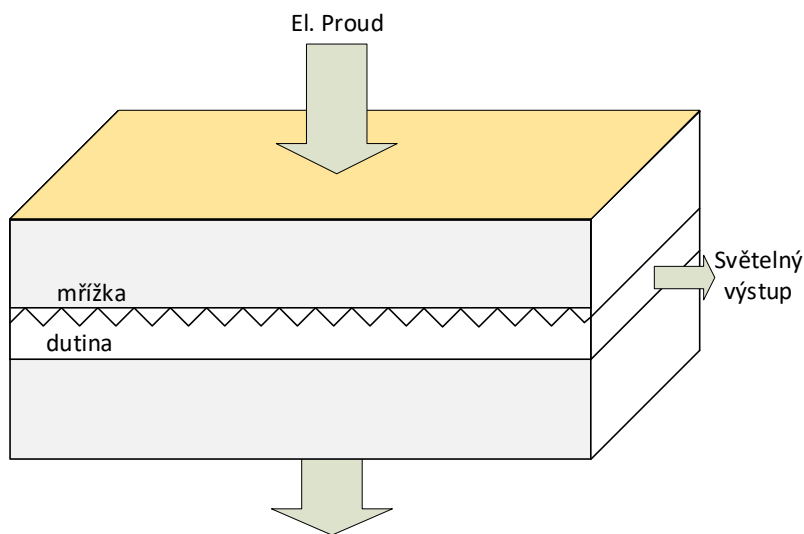
Lasery jsou vhodné na dlouhé vzdálenosti, protože mají stabilní vlnovou délku vyzařovaného světla. Za největší nevýhodu se považuje nutnost proudové a teplotní stability. V případě jakýchkoliv změn je nutno změnit parametry.

Lasery dělíme dle typu struktury:

- DFB – (distributed feedback laser) laser s rozprostřenou zpětnou vazbou,
- FP – Fabryův-Perotův laser.

DFB laser

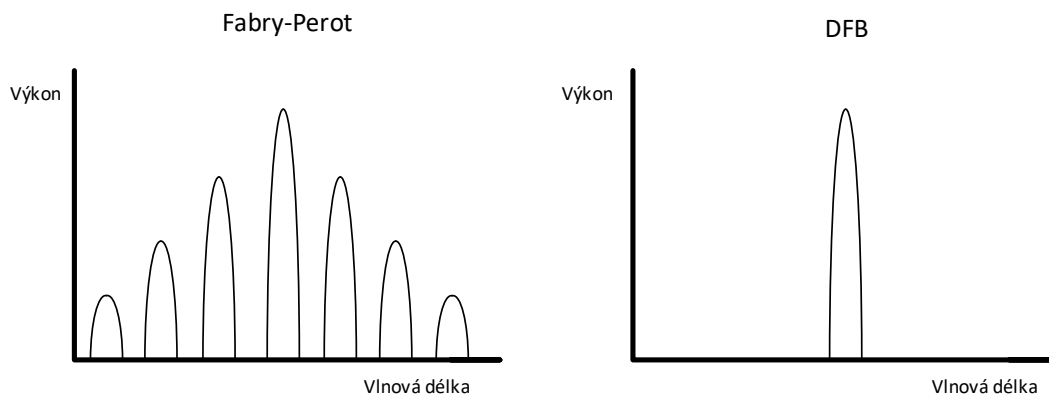
Jedná se o laser s rozprostřenou zpětnou vazbou, který vysílá výhradně jednu vlnovou délku díky vnitřnímu uspořádání laseru. Jeho struktura je kompozicí materiálů. V dutině se nachází materiálové zdrsnění – Braggova mřížka, která tvoří povrch s určitým indexem lomu. Díky tomuto uspořádání se vedlejší vlnové délky odráží zpět do dutiny. Hlavní vysílací vlnová délka je distribuována dutinou a je vyzařována z laseru. Způsob vyzařování je znázorněn na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Struktura DFB laseru (Převzato a upraveno z [2])

FP - Fabryův-Perotův laser

Ze standardních laserů Fabry-Perotova typu nevychází jen jedna vlnová délka, ale i několik dalších, které jsou přibližné vlnové délce, která je požadována. Tyto podružné vlnové délky mají však nižší výkon. FP lasery jsou nevhodné pro WDM z důvodu možné interference těchto podružných vlnových délek.



Obr. 1.3: Výstup z laserů vlnové délky (Převzato a upraveno z [2])

CW laser

Je laser emitující nepřetržitý laserový paprsek s regulovaným tepelným výstupem a intenzitou. Jejich hlavní výhodou je vysoký výkon a vysoká stabilita. Dále v simulacích byl použit laser s lorentzovskou vyzařovací charakteristikou.

1.1.3 Druhy přijímačů (diod)

PN

Je dioda s klasickým PN přechodem. V materiálu přechodu se tvoří pár elektron-díra a generuje se při dopadu fotonu na polovodič. Při absenci světla se chová jako dioda. Vlivem fotoelektrického jevu narůstá průchod elektrického proudu v závěrném směru.[3]

PIN

Je dioda s přechodem P, I, N kde I je nedopovaná oblast mezi P a N. Tyto diody mají výhodu oproti klasickým diodám v tom, že nejsou limitovány kapacitou přechodu. Mohou tak dosáhnout vysoké citlivosti a rychlosti přechodu mezi propustným a závěrným stavem.[3]

APD - Lavinové fotodiody

Principem funkce je, že dopadem fotonu na materiál se generuje kaskádovitý efekt pohybujících se párů nosičů, který generuje větší citlivost než PIN diody. Bohužel při porovnání s PIN diodou generují kvůli lavinovému efektu větší šum [4].

1.1.4 Druhy vláken

SMF - jednovidové vlákno

Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, dle doporučení ITU-T G.652.D[6] by mělo mít následující parametry:

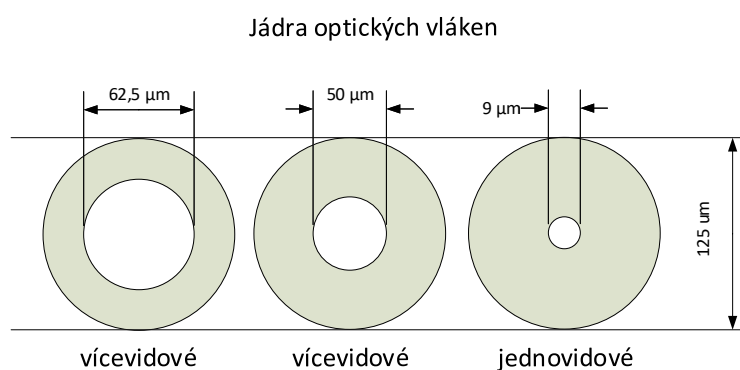
- jádro : $8,6-9,2 \mu\text{m}$, plášť $125 \pm 0,7 \mu\text{m}$,
- maximální útlum při 1310 nm $0,4 \text{ dB/km}$, při 1550 nm $0,35 \text{ dB/km}$, při 1625 nm $0,4 \text{ dB/km}$,
- maximální polarizační vidovou disperzi $0,2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$.

Jednovidové vlákno je vhodnější na delší vzdálenosti kvůli velkému úhlu odrazu a malé vidové disperzi.

MMF - vícevidové vlákno

Vícevidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, dle doporučení ITU-T G.651.1[7] by mělo mít následující parametry:

- jádro : $50 \pm 2,5 \mu\text{m}$, plášť $125 \pm 1 \mu\text{m}$,
- maximální útlum při 850 nm $3,5 \text{ dB/km}$, při 1300 nm 1 dB/km .



Obr. 1.4: Jádra optických vláken (Převzato a upraveno z [1])

Nevýhodou je velká vidová disperze. Kvůli tomu je lepší tato vlákna použít na menší vzdálenosti. Alternativou jsou vlákna gradientní, které zmenšují index lomu se zvětšující se vzdáleností od středu vlákna. Výhodou je eliminace vidové disperze.

1.1.5 Vlivy ve vláknech

Jednou z negativních vlastností vláken jsou útlumy. Ty se dělí na:

- ztráty absorpcí prostředí,
- vyzařováním z vlákna,
- rozptylem na nehomogenitách.

Při výrobě vláken je důležitá co nejvyšší homogenita vlákna a o absence příměsí iontů kovů jako třeba Fe, Cu, Cr. Tyto příměsi způsobují rozptylové ztráty, které jsou nazývány Rayleighovy. Rayleighovy rozptyly jsou nepřímo úměrné čtvrté mocnině vlnové délky sířícího se záření a rostou velmi rychle směrem k UV oblasti [5, str. 16–17].

Chromatická disperze

Chromatická disperze je druhem zkreslení procházejícího impulsu optickým vláknem a vzniká při přenosu více vlnových délek. Jeho projevem je spoždění signálu dané vlnové délky. Impulz se průchodem deformuje a následně pak zasahuje do jiných vlnových délek.

Ideální je použití vlákna pro vlnovou délku, kde se hodnota chromatické disperze blíží nebo je rovna nule. Ovšem chromatickou disperzi je možné kompenzovat u starších vláken například pasivní optickou kompenzací, ke které se používají starší kompenzační vlákna.

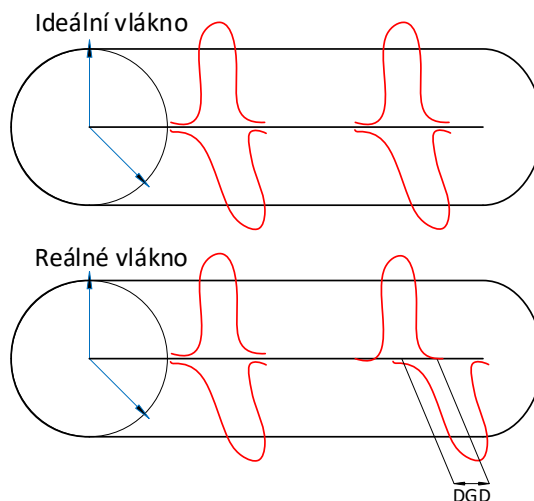
Polarizační disperze

„Polarizační vidová disperze (PMD) spočívá v tom, že optické vlákno není ideálně kruhové a homogenní. Světlo se ve vlákne šíří ve dvou navzájem kolmých rovinách, tzv. polarizačních videch. Vlivem dvojlomu se ovšem záření šíří v obou těchto videch různou rychlostí.“ [8]

Jak se paprsky ve vlákne rozcházejí vůči ideálnímu vláknu je znázorněno na obrázku 1.5. Celková hodnota polarizační disperze se vyjadřuje v jednotce ps. Vzniká mechanickým namáháním optického vlákna a deformací optického jádra. Koeficient polarizační disperze je vyjádřen jednotkou $ps \times \sqrt{km}$. Celkové spoždění ve vzdálenosti není tedy lineární.

Ve vysokorychlostních systémech a na dálkových přenosech ovšem tento jev významně degraduje výkon systému. Omezení hodnot polarizační vidové disperze

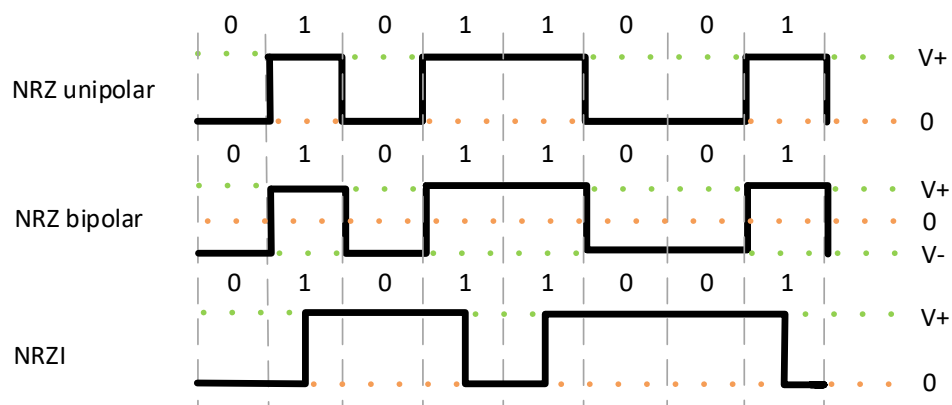
je možné pouze výběrem špatných vláken z kabelu nebo výměnou části trasy, ve které se nesplňují požadované hodnoty. Na obrázku 1.5 je možné vidět diferenční skupinové zpoždění signálu (DGD), které je základním měřítkem PMD.



Obr. 1.5: Zkreslení signálu PMD (Převzato a upraveno z [8])

1.1.6 Kódování NRZ

NRZ je linkový kód, tyto kódy se užívají k reprezentaci digitálního signálu při přenosu přes médium. NRZ je kódem Non-Return-to-Zero a reprezentuje logickou '0' a '1' stejnsměrnými signály. Unipolární NRZ má například +5 Voltů jako logickou '1' a 0 Voltů jako logickou '0'. V obrázku 1.6 je vyjádření nejzákladnějších NRZ signálů.



Obr. 1.6: Druhy NRZ (Převzato a upraveno z [9])

1.1.7 Chybovost BER - bit error rate

BER definuje chybovost při přenosu a je vyjádřena jako poměr mezi počtem chyb z celkového počtu bitů v přenosu. Je tedy vyjádřena jako [10]:

$$BER = \frac{N_e}{N_c} [-] \quad (1.1)$$

kde N_e je rovno počtu chybných bitů a N_c celkovému počtu bitů v přenosu.

BER je bezrozměrná veličina. Bitová chybovost může být alternativně vyjádřena v čase. Celkový počet bitů v přenosu lze vyjádřit vynásobením přenosové rychlosti časem. Při předpokladu chybovosti BER 10^{-12} po dosazení do vzorce 1.2 vyjde, že to je jeden bit ze 10^{-12} bitů. Pro lepší názornost byla připravena tabulka 1.1 s rychlostmi 0,1,1,10,40 a 100 Gbit/s.

Po dosazení do vzorce:

$$BER = \frac{N_e}{V_p \cdot t} [-] \quad (1.2)$$

kde V_p je přenosová rychlost, zjistíme t , neboli čas ve kterém se vyskytne jeden chybný bit. Proto je třeba dbát na velmi nízkou chybovost při vyšších přenosových rychlostech. $N_e = 1$, $BER = 10^{-6}$, $V_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$.

Tab. 1.1: Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování)

Přenosová rychlost [Gbit/s]	Bitová chybovost [-]		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
0,1	1 s	1000 s	277,78 dní
1	1 ms	1s	1000 s
10	100 μ s	100 ms	100 s
40	25 μ s	25 ms	25 s
100	10 μ s	10 ms	10 s

Ke zlepšení přenosových vlastností a snížení BER lze „použít kódování s dopředným potlačením chyb (FEC), jeho principem je přidání redundantních bajtů do sledu vysílaných dat, což umožní detekci a opravu určitého počtu chyb v přijímači. Redundantní bajty tvoří pouze zlomek vysílaných dat.“ [10, str. 85]

1.1.8 Diagram oka

Diagram oka je grafické zobrazení pro analýzu kvality signálu při přenosu. Základní parametry, které se u diagramu určují je otevření oka a šířka oka. Z diagramu je možné vyčíst chybovost BER, mezisymbolovou interferenci, jitter a další rušivé vlivy na signál.

Q faktor

V diagramu oka Q faktor určuje kvalitu a značí optimální rozhodovací úroveň. Dále z něj lze vypočíst bitovou chybovost přenosu přes médium.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) [-] \quad (1.3)$$

Vzorec 1.3 byl převzat z [11]. Kde Q je Q faktor a erf je Gaussova chybová funkce, erfc je doplňková chybová funkce .

Z Q faktoru je dále možné zjistit i hodnotu SNR optického signálu. Q faktor je rozdílem mezi průměrnými hodnotami úrovní signálů pro hodnoty logické '1' a '0' (ve vzorci vyjádřeno jako μ_0 a μ_1) a poděleno součtem hodnot šumu. Vlastní Q faktor lze vyjádřit vztahem [12]:

$$Q = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma_0 + \sigma_1} [-] \quad (1.4)$$

Kde:

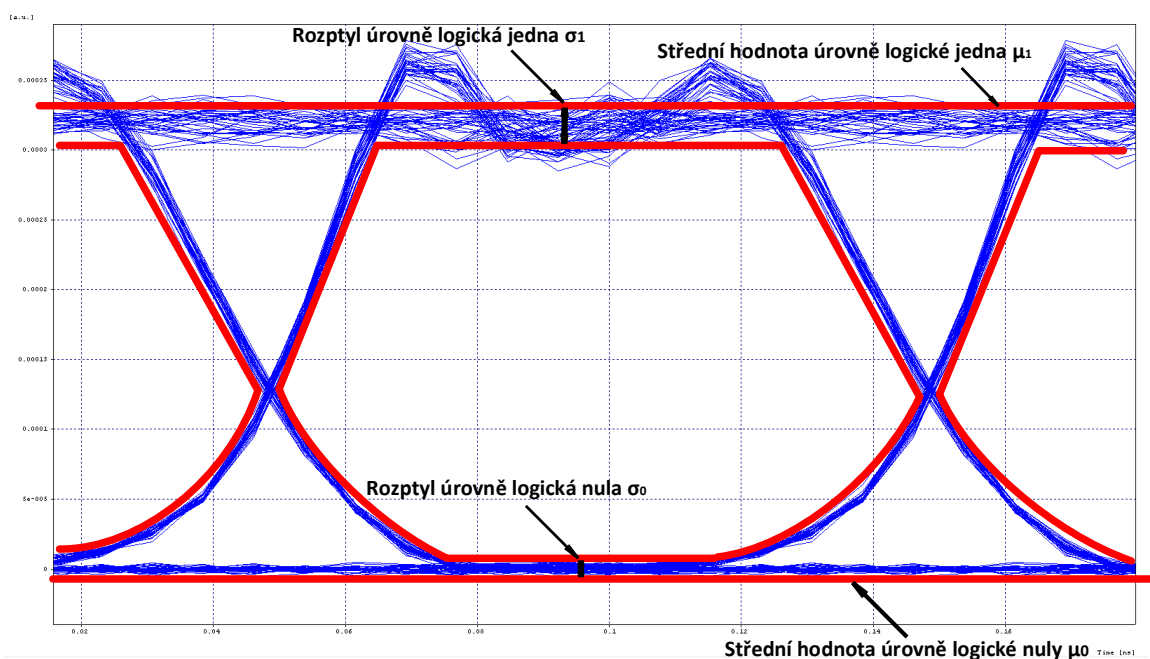
μ_0 – střední hodnota úrovně logické nuly,

μ_1 – střední hodnota úrovně logické jedna,

σ_0 – rozptyl hodnot úrovně logická nula,

σ_1 – rozptyl hodnot úrovně logická jedna.

Detailně zobrazuje obrázek 1.7:



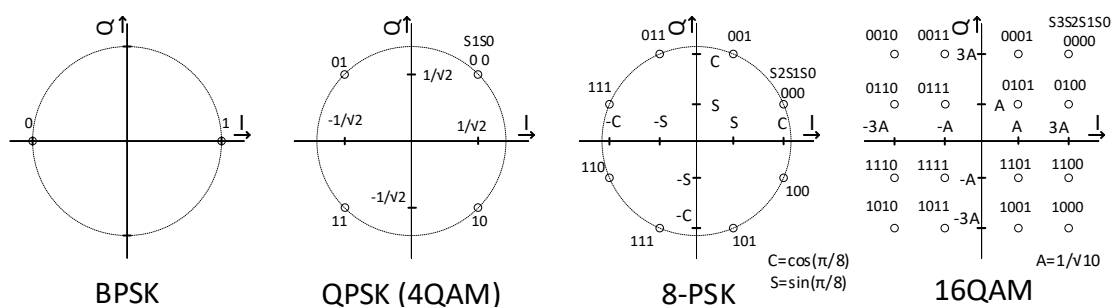
Obr. 1.7: Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování)

1.1.9 Modulační techniky

PSK - Moderní systémy klíčování

Snaha o efektivnější využití komunikačních kanálů vede k vytváření nových, stále více složitějších, modulačních systémů a kódování. Aby bylo možné posoudit, který ze systémů je pro daný účel nejvhodnější, jsou zavedeny parametry, které charakterizují jejich vlastnosti. Zvláště v posledních letech je možné zřetelně sledovat neustále se zvyšující požadavky zákazníků telekomunikačních společností na poskytované přenosové rychlosti. Při dané šířce kmitočtového pásma propustnosti B nelze příliš zvětšovat přenosovou rychlost nad hranici, která je číselně rovna B , pouhým zkracování doby trvání signálových prvků. Řešení tohoto problému spočívá v použití vícestavového klíčování, kdy jednomu prvku signálu odpovídá sekvence několika bitů. Bohužel rozpoznání přijatých prvků nám komplikuje aditivní šum, což limituje počet stavů signálů [10, str. 55].

Konstelační diagramy v obrázku 1.8:



Obr. 1.8: Diagram oka (Zdroj: Převezato a upraveno z [16])

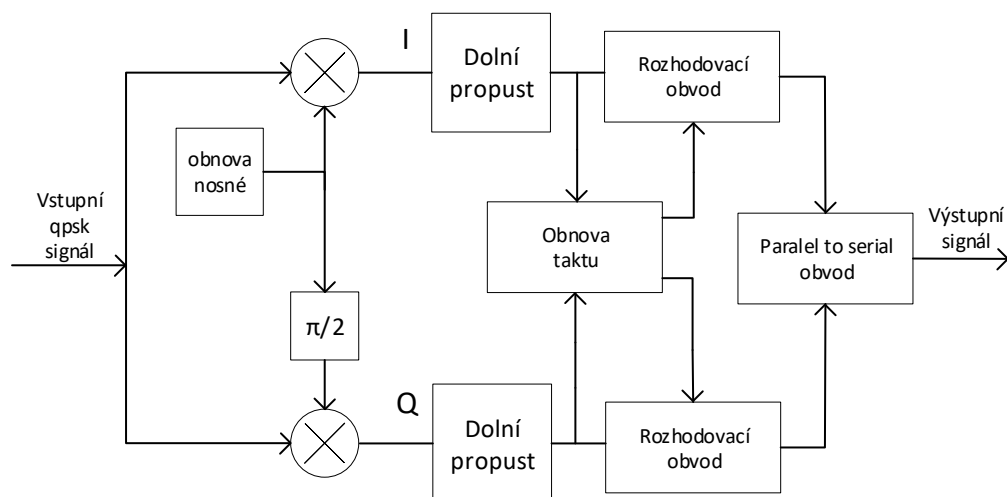
BPSK (Binary Phase Shift Keying) fázové klíčování je dvojestavová modulace, kde kmitočet nosné skokově mění fázi, která nabývá hodnot 0° nebo 180° . Modulační rychlost je rovna jednomu symbolu na bit a jeho přenosová rychlost je rovna modulační rychlosti. Výhodou BPSK modulace je vyšší odolnost proti rušení.

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) používá čtyři signálové prvky vyjádřené nosnou vlnou s odlišnou počáteční fází. Každému signálovému prvku odpovídá jedna bitová dvojice tj. dibit. Konstelační diagram má různou konfiguraci, sousední fáze signálových prvků se však vždy liší o $\pi/2 \text{ rad}$ [10, str. 55].

V rámci přenosu symbolu se přenáší 2 bity.

Schéma modulátoru je shodné jako QAM modulátoru znázorněném na obrázku 1.12. Pouze pro QPSK se kódér chová jako rozbočovač signálu.

Demodulátor je založen na dvojici součinových demodulátorů, které přijímaný signál násobí jednak se synfázní nosnou $2\cos(\omega_c t)$ a jednak s kvadrurní nosnou $2\sin(\omega_c t)$. Dolními propustmi jsou pak z výsledných signálů v obou větvích odstraněny vyšší harmonické složky a následně jsou v rozhodovacích obvodech paralelně vyhodnoceny jednotlivé bity. Ty se potom pomocí P/S převodníku seřadí za sebou (sériově) [10, str. 59]. Schéma demodulátoru QPSK je na obrázku 1.9:



Obr. 1.9: QPSK demodulátor (Zdroj: Převezato a upraveno z [10])

Na základě znalosti doby trvání symbolu a požadavku na šířku pásma může být odvozena kapacita v bitech za sekundu na Hz pro různá modulační schémata. Tyto údaje sumarizuje tabulka 1.2.

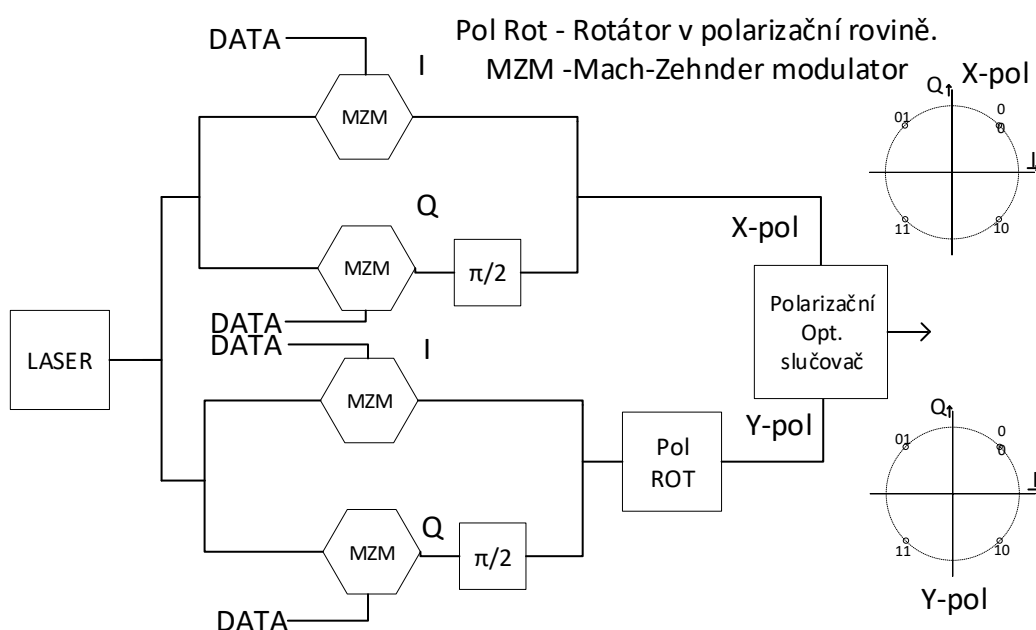
Tab. 1.2: Tabulka kapacit modulačních formátů (Zdroj: [13]).

Modulační schéma	Doba symbolu	Bit rate bit/s	Šířka pásma	Kapacita bit/s/Hz
BPSK	T	$1/T$	$1/T$	1
QPSK	T	$2/T$	$0,5T$	2
4-QAM	T	$2/T$	$1/T$	2
16-QAM	T	$4/T$	$1/T$	4
64-QAM	T	$6/T$	$1/T$	6

PM-QPSK

Z anglického názvu Polarization multiplexed - Quadrature Phase-Shift Keying. Někdy označována jako DP-QPSK (dual polarization). Jak název vyjadřuje jde o modulaci QPSK obohacenou o další polarizační rozměr ve vlákně. PM-QPSK je rozšířený koherentní způsob modulace, která pro svoji funkci na přijmači vyžaduje znalost fáze vysílaného signálu.

Modulátor PM-QPSK je složen ze dvou QPSK modulátorů. Výstupy z těchto modulátorů prochází polarizačním slučovačem dvou signálů (Ve schématu 1.10 rozděleno na optický slučovač a ve větvi Y-polarizace jako rotátor polarizace).



Obr. 1.10: PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převezato a upraveno z [14])

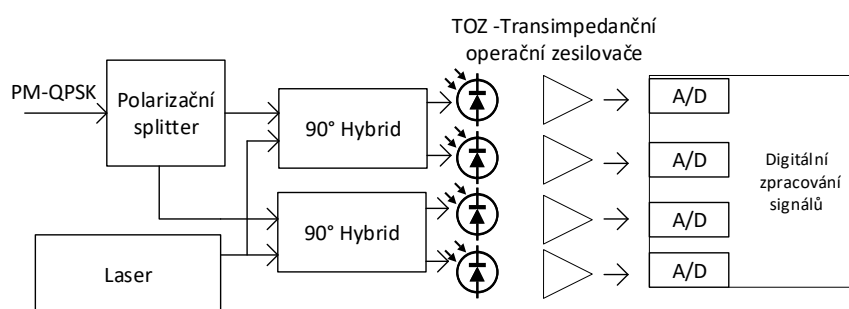
Obrázek 1.11 znázorňuje funkční blokové schéma moderního optického koherentního přijímače. Příchozí optický signál prochází polarizačním rozbočovačem (polarizační splitter), který rozděluje signál na dva ortogonální polarizační signály. Tento rozdělovač vytvoří dva signály, z nichž je jeden polarizovaný v ose X a druhý v ose Y. Každý z nich je předán do 90-ti stupňového optického hybridního obvodu. Tento obvod umožňuje, aby složky I a Q fáze signálu byly extrahovány v důsledku známého signálu generovaného lokálním oscilátorem. Tento proces extrakce umožňuje lokální oscilátorový laser, který je podstatou koherentní detekce. Fázové signály se nyní převedou z optické domény na elektronickou doménu pomocí série vyvážených

fotodetektorů.

Každý z těchto signálů se skládá ze tří prvků:

- úroveň šumu,
- element digitálního převodníku představující výkon lokálního oscilátoru,
- koherentní signál.

Pokud by byl použit jediný fotodetektor, bylo by nutné použít lokální oscilátorový laser o 20 až 25 decibelů (dB) větší výkon než přichází signál, aby výsledný signál mohl dominovat oproti generovanému šumu. Pomocí vyváženého fotodetektoru je možné použít mnohem méně výkonný lokální oscilátor. Za účelem obnovení přenašených bitů se provádí synchronizace nosné fáze v bloku zpracování signálu [14].



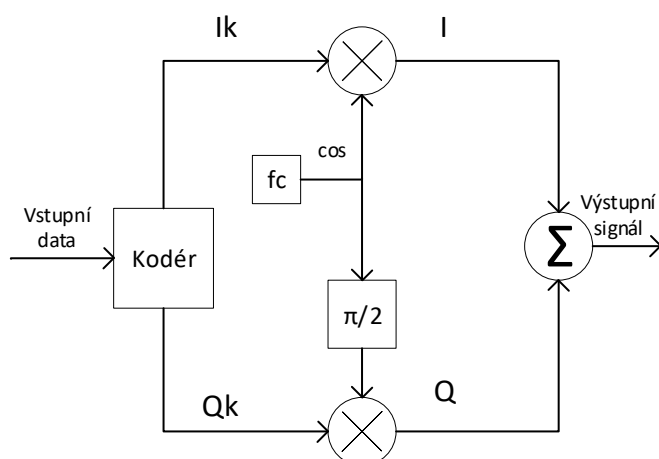
Obr. 1.11: PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])

Kromě obrovského zvýšení citlivosti detektoru může být koherentní detektor laděn tak, aby přijímal pouze určitou vlnovou délku, což umožňuje vysokou úroveň selekce signálu z kanálů WDM.

QAM - z angl. Quadrature Amplitude Modulation

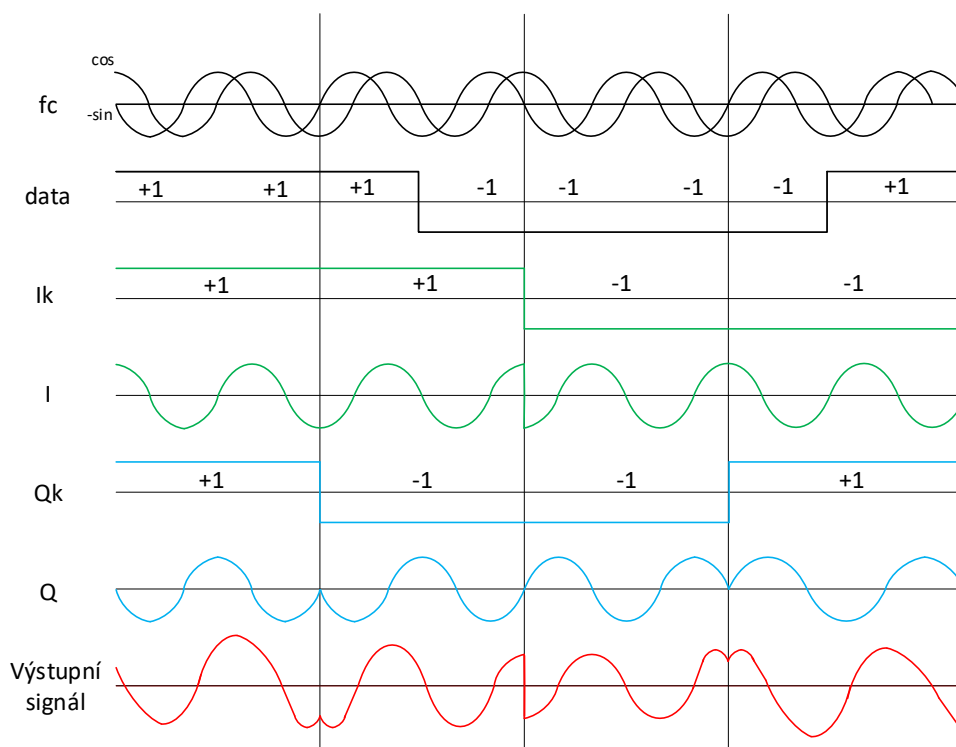
Využívá jak amplitudové, tak i fázové komponenty, aby poskytly formu modulace, která je schopna zajistit vysokou úroveň účinnosti využití spektra. QAM, kvadraturní amplitudová modulace byla použita pro některé analogové vysílání, včetně AM stereo přenosů, ale do širšího použití se dostala v datových aplikacích. Je schopna poskytnout vysoce efektivní formu modulace dat a jako takový je používán ve všem, od mobilních telefonů po Wi-Fi a téměř všechny ostatní formy vysokorychlostního datového komunikačního systému. QAM je signál, ve kterém jsou dva nosiče posunuty ve fázi o 90 stupňů (tj. sinus a kosinus) jsou modulovány a kombinovány. V důsledku jejich fázového rozdílu 90° jsou v kvadraci, a to vede k názvu kvadraturní modulace. Často se jeden signál nazývá signál In-phase „I“ a druhý signál je kvadraturní „Q“.

Výsledný celkový signál sestávající z kombinace nosičů I a Q obsahuje jak amplitudovou, tak fázovou variaci. Vzhledem k tomu, že jsou přítomné oba amplitudové a fázové změny, může být také považována za směs amplitudové a fázové modulace. QAM umístí dva nezávislé nosné signály potlačené dvojitým postranním pásmem ve stejném spektru jako jeden běžný nosný signál s dvojitým postranním pásmem. Schéma modulátoru QAM je zobrazeno na obrázku 1.12:



Obr. 1.12: QAM modulátor (Zdroj: Převezato a upraveno z [15])

Průběhy signálu 1.13:

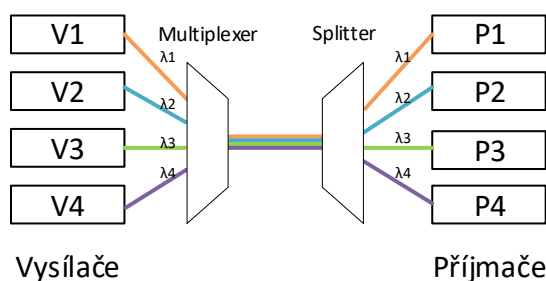


Obr. 1.13: Průběhy signálů v modulátoru 1.12 (Zdroj: Převezato a upraveno z [15])

1.1.10 Technologie přenosu - WDM,TDM

WDM

Z anglického Wavelength-division multiplexing je vlnový multiplex, který představuje technologii spojování signálů pomocí vlnových délek. Ty mohou souběžně probíhat optickým vláknem, aniž by se ovlivňovaly. Jedná se tedy o frekvenční multiplex. Na začátku trasy se nachází multiplexor, který má za úkol navázat tyto vlnové délky do společného média – vlákna. Na konci se nachází demultiplexor, který vlnové délky rozdělí ke klientům. WDM pracuje jak na jednovidovém tak na vícevidovém vlákně. Počet vlnových délek je škálovatelný.



Obr. 1.14: Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [17])

WWDM

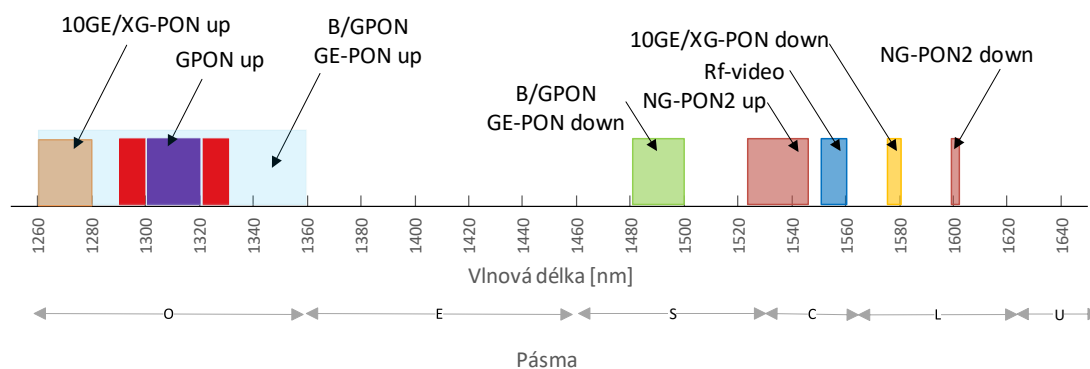
„WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), tzv. „široký“ vlnový multiplex většinou používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová optická vlákna). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typický odstup 25 nm.“ [18, str. 133]

CWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hrubý“ vlnový multiplex vznikla jako levnější varianta DWDM. Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. V doporučení ITU-T G.694.2 [19, str. 3] je stanoveno 18 vlnových délek s kanálovými rozestupy 20 nm a s tolerancí $\pm 6-7$ nm. Oproti DWDM jsou náklady na technologii menší například při pořizování vysílačů. Ovšem z toho vyplývá i nižší počet použitelných kanálů.

DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hustý“ vlnový multiplex používá minimální odstupy mezi jednotlivými kanály, takže umí do jednoho vlákna implementovat desítky vlnových délek. V těchto případech se využívá jednovodových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Při tom je nezbytné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémně úzkou spektrální charakteristiku vyzařovaných vlnových délek. V doporučení ITU–T G.694.1 [20, str. 2] pro technickou aplikaci tohoto systému je definováno několik variant rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Referenční kmitočet od kterého se vytváří další kanály je dle výše zmíněného doporučení 193,1 THz. DWDM systémy mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S, C a L optického pásma.



Obr. 1.15: Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)

ITU pro WDM definuje rozsahy frekvencí, tyto frekvenční pásma jsou:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260–1360 nm,
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360–1460 nm,
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460–1530 nm,
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530–1565 nm,
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565–1625 nm,
- pásmo U (Ultra-Long): vlnové délky 1625–1675 nm.

TDM - Časový multiplex

Time-division multiplex je metoda pro přenos a přijímání nezávislých signálů do jednoho vlákna. Hlavním úkolem TDM je korigovat data tak, aby se ve vlákne objevily v daném časovém úseku a navzájem tak nekolidovaly. Narozdíl od WDM, který pracuje s frekvencemi, TDM pracuje s časem. TDM je užit v PON pro sestupný směr (downstream).

TDMA

Z anglického Time Division Multiple Access je metodou přístupu k médiu. Na rozdíl od WDM, kde je použita paralelizace spojů, je zde součinnost spojení definována jako sériová posloupnost vysílacích sekvencí. Každý účastník má přidělen určitý čas - sekvenci k přístupu k médiu tzv. *timeslot*. Tento časový úsek slouží výhradně k vysílání dat od tohoto účastníka. Timesloty jsou součástí TDMA rámce a neustále se opakují. Každý klient má jeden timeslot v rámci. TDMA vyžaduje časovou synchronizaci, aby klienti mohli k médiu přistupovat. TDMA je užit v PON pro vzestupný směr (upstream).

1.2 AON, PON

OLT, neboli optické linkové zakončení, je výchozí prvek přístupové sítě, tzv. centrální jednotka. Tento prvek je přechodným prvkem mezi přístupovou sítí a páteřní sítí. Nejčastěji L2/L3 switch v PON systému. Hlavní funkcí OLT je kontrola toku informací skrze optickou datovou síť. Informace z OLT putují směry k uživateli downstream a od uživatele upstream. OLT provádí i konverzi protokolů, protože v páteřních sítích se používají různé druhy protokolů (nejčastěji Ethernet, SDH nebo ATM), a proto je potřeba zajistit jejich konverzi. Dalším důležitým úkolem OLT je spravování, dohled a řízení koncových jednotek ONU/ONT [5, str 51-53].

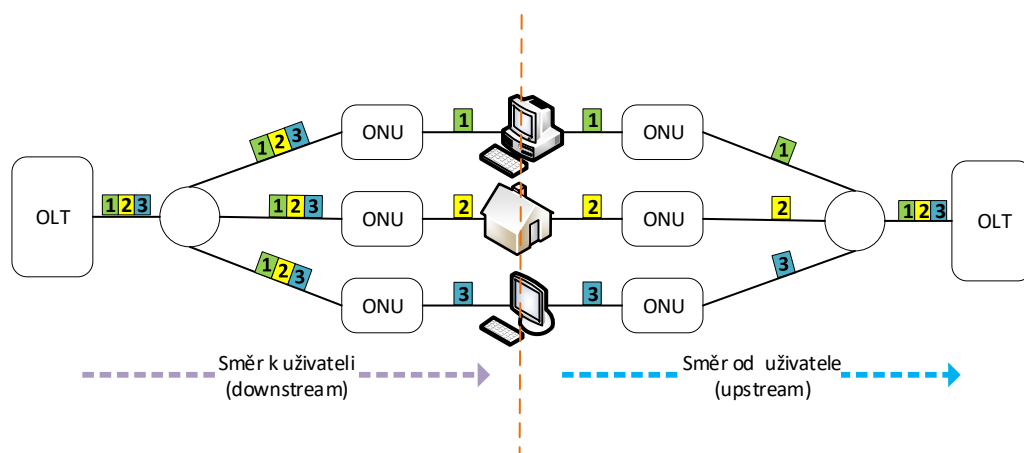
Optická síťová jednotka (ONU) je koncový prvek, který převádí elektrické signály na optické. Lze si takové zařízení představit jako router s optickým WAN portem. ONU je tedy zařízením pro připojení například domácnosti k poskytovateli. Koncový terminál uživatele (ONT), funkcí vyjadřuje to samé jako ONU. Rozdílem je značení - ITU-T používá označení ONT, IEEE naopak ONU. Oboje je tedy zařízením u uživatele. Jak ONU tak ONT jsou prvky, které na straně uživatele (klienta) převádí optický signál na elektrický a pomocí strukturované kabeláže nebo bezdrátového připojení vytváří možnost připojování klientů do sítě. ODN (Optical Distribution Network) je nedílnou součástí systému PON a jedná se o přenosové médium mezi ONU a OLT. Součástí jsou konektory, optická vlákna a sváry.

1.2.1 AON - Aktivní optická síť

U tohoto typu sítě se v trase používají prvky vyžadující elektrickou energii pro svoji činnost jako například: routery, switche a další. Funkční rozdíl mezi AON a PON je v tom, že u AON dochází ke třídění paketů na aktivních prvcích a u PON dostávají data všechny ONT. Proto je AON spíše využívána pro P2P spoje a na delší vzdálenosti. Maximální dosah je cca 120 km.

1.2.2 PON - Pasivní optická síť

Je typ optické sítě, která používá prvky, ve kterých není nutno použít další zdroj elektrické energie. PON sítě jsou P2M (Point-to-multipoint) a pracují výhradně na technologii TDMA. To znamená, že z výchozího bodu je připojeno větší množství uživatelů. Vstupní médium je sdílenou součástí trasy pro poskytovanou službu. V této trase se používají pouze pasivní prvky – nejčastěji rozbočovače na splnění požadavku připojení více klientů, aniž by bylo třeba využít zesilovačů či jinou úpravu optického signálu. Z tohoto důvodu není dosah tak velký jak u AON. U PON je to mezi 10–20 km.



Obr. 1.16: PON topologie (Vlastní zpracování dle [5, str. 52])

1.2.3 Vývoj PON

Pasivní optické sítě (PON) jsou stále častěji považovány za klíčový prvek současných a budoucích širokopásmových přístupových sítí. Masivní užití PON je způsobeno rostoucí poptávkou po šířce pásma, primárně poháněnou vysokorychlostním internetovým provozem. Tento vývoj vyvolává potřebu vyšší šířky pásma v sestupném směru (downstreamu). Vyšší požadavek na symetrický provoz vzniká zvyšováním potřeb uživatelů, kteří síť využívají pro hraní online her, sdílení souborů nebo provozem cloudových služeb. Z dlouhodobého hlediska je proto potřeba převádět přístupové sítě na symetrické.

Pro pasivní optické sítě nové generace (NG-PON) očekávají poskytovatelé služeb lepší možnosti přenosu dat a podporu služeb nad stávajícími PON. Zatímco sítě

NG-PON2 jsou považovány za nejslibnější přístup, poskytovatelé služeb se musí vypořádat s vyvíjejícími se standardy.

Stejně jako u všech sítí musí zařízení používané s PON dodržovat standardy pro provoz. Ty jsou nastaveny skupinami ITU a IEEE a v případě ITU se budou zabývat standardy GPON (Gigabit PON), XG(S)-PON (10-Gbps PON) a NG-PON2. Z velké části je dnes používán GPON. Aktuální doporučení GPON a IEEE EPON však neumožňují další škálování počtu účastníků nebo kapacity pro dosažení požadavků na šířku pásma koncového uživatele. Dalšími kroky bude zvýšení kapacity služeb a přechod na technologie se symetrickou nabídkou rychlostí. Tabulka 1.3 uvádí standardy a jak bude příští generace PON zvyšovat kapacitu.

Tab. 1.3: Tabulka PON specifikací (Převzato a upraveno z [21])

	GPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2	GE-PON	10G-EPON	100G-EPON
Standardy	ITU-T G.984.1	ITU-T G.987	ITU-T G.9807.1	ITU-T G.989	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	IEEE 802.3ca (2019)
Downstream/Upstream rychlosti [Gbps]	2,4 / 1,2	10 / 2,5	10 / 10	40 / 10	1,25 / 1,25	10 / 10	100 / 100
Split poměr	1:64 (128)	1:128 (256)			1:64 (128)	1:128	nespecifikováno
Společné fungování s	-	G-PON			-	GE-PON	

1.2.4 GPON, GEPON

GPON vychází z technologie BPON, což je širokopásmová pasivní optická síť, která první implementovala WDM a implementuje protokoly z linkové vrstvy (ATM, Ethernet). GPON se zlepšil v porovnání s APON a BPON a je zpětně kompatibilní. Je definován v doporučení ITU G.984.1 až G.984.7. Je to tedy optický systém se šířkou pásma 2,4 Gbit/s v sestupném směru od OLT a 1,2 Gbit/s ve vzestupném směru.

Počet rozdělení ze splitteru se mohou lišit od 2 do 64. Optický přenos vláken z ústředí na každého uživatele může být dosah až 20 km.

Nominální přenosové rychlosti GPON downstream:

- 1244,16 Mbit/s,
- 2488,32 Mbit/s.

Upstream:

- 155,52 Mbit/s,
- 622,08 Mbit/s,
- 1244,16 Mbit/s,

Přestože jsou všechny kombinace možné (kromě sestupného směru 1,2 Gbit/s a vzestupný směr 2,4 Gbit/s), nejčastěji poskytovatelé nabízejí pouze 1,2 Gbit/s

upstream a 2.4 Gbit/s ve směru downstream. Provozní rozsah vlnových délek je 1480–1500 nm pro sestupný směr a 1260–1360 nm pro vzestupný směr. Kromě toho rozsah vlnových délek 1550–1560 nm lze použít pro následnou distribuci RF videa.

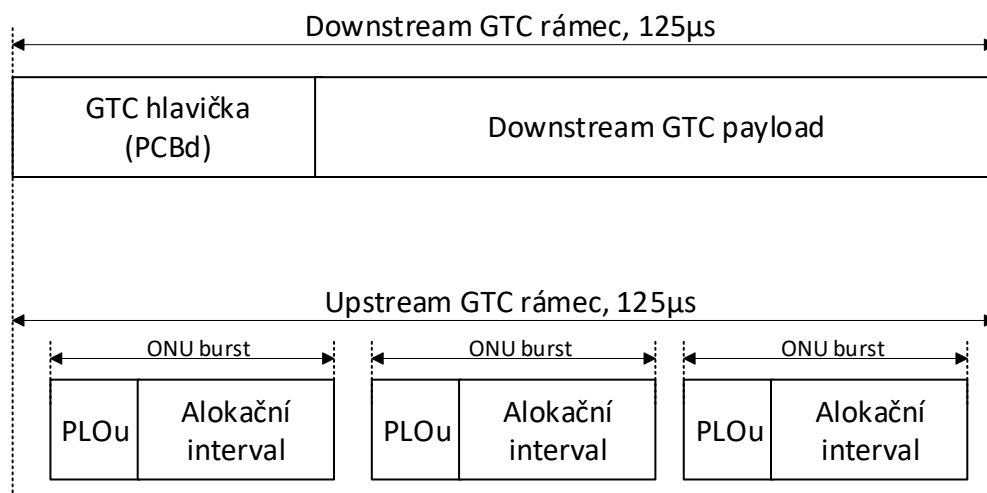
Kódování s dopředným potlačením chyb (FEC) je matematická technika zpracování signálu, která kóduje data tak, aby mohly být detekovány chyby a opraveny. S FEC jsou redundantní informace přenášeny spolu s původními informacemi. Množství redundantních informací je malé aby FEC nezvyšovalo režijní náklady. FEC má za následek zvýšení rozsahu útlumu GPON přibližně o 3–4 dB.

Základní funkcí GPON je, že data jsou vysílána všem ONU, a každá ONU má přidělený čas, kdy má možnost data přenést k OLT. Ve vzestupném směru GPON se připojení podobá P2P, takže veškerá komunikace je zabezpečena před odposloucháním. Sestupné vysílání je všesměrové z OLT ke všem ONU v TDM doméně. Každé ONU akceptuje pouze rámce určené pro něj a přenos může být zajištěn šifrováním. Je to tak proto, že uživatel může přeprogramovat svůj vlastní ONU a zachytit všechna data v sestupném směru příslušné všem ONU připojeným k této OLT. Kvůli tomu každá důvěrná informace může být poslána jako plain text. Takže doporučení GPON G.984.3 popisuje použití zabezpečení informací aby uživatelé měli možnost přístup pouze k údajům určeným pro ně. Zabezpečující algoritmus je AES a akceptuje délku klíče 128, 192, 256 bitů.

GPON používá GEM (GPON Encapsulation Method neboli GPON zapouzdřovací metoda) jako metodu, která zapouzdřuje data přes GPON. I když může být jakýkoliv typ dat zapouzdřený, skutečné typy zapouzdření závisí na přenášené službě. GEM poskytuje připojení orientované sdělení. Tato metoda je mírně upravenou verzí doporučení ITU-T G.7041, které se týká postupu generického rámcování (specifikace pro odesílání IP paketů přes síť SDH). Downstream rámec je sestaven z fyzického řídicího bloku PCBd a payloadu. Payload obsahuje ATM buňku ($n \times 53B$) a GEM sekci. Celý rámec má délku trvání 125 μs .

GTC rámec pro sestupný směr má délku trvání 125 μs a délka je 38 880 bajtů, což odpovídá rychlosti v sestupném směru 2.48832 Gbit/s. Délka pro vzestupný směr je 19 440 bajtů, při stejné době trvání jako u sestupného směru je to 1,24416 Gbit/s.

GEAPON je definováno v IEEE 802.3ah a rozdílem vůči GPON je přenos ethernetových rámců oproti GEM.



Obr. 1.17: GTC rámec GPON (Upraveno dle: [22, str. 29])

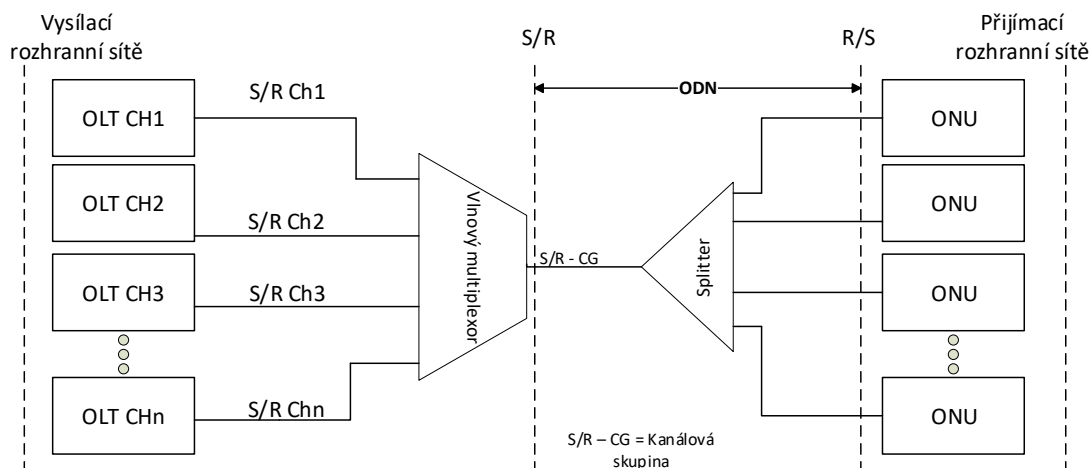
1.2.5 XG-PON

Alternativním názvem je Next Generation-Passive optical network. Jak již název napovídá je to pasivní optická síť nové generace. Používá P2M propoje pro komunikaci a je výchozí pro použití pro FTTx. XG-PON nabízí širokou škálu možností při zachování nízké ceny systému. Jako hlavní technologie je zde použita TDMA.

XGS-PON je XG-PON s navýšenou upstream rychlostí na symetrický poměr vysílacích rychlostí vzestupného a sestupného směru.

1.2.6 NG-PON2

Jako další stupeň evoluce technologií definuje ITU-T G.989 druhou generaci NG-PON, 40 Gbit/s PON, která kombinuje užití TDM a WDM. Další požadavek vyplývající z opětovného použití rozmístněné infrastruktury optických vláken se týká útlumu optické cesty. NG-PON2 musí být schopno provozovat stejnou pasivní distribuční síť (ODN) definovanou dříve pro G-PON a XG-PON. Rozšiřuje XG-PON, je to tedy síť s P2M topologií a nyní je výchozí pro nasazování FTTx. To znamená, že optické útlumové třídy definované pro XG-PON musí být dosažitelné. Rozdílová ztráta je definována jako absolutní rozdíl mezi optickými ztrátami libovolných dvou cest uvnitř stejné ODN. To usnadňuje postupnou migraci stávajících odběratelů, kteří přecházejí na novou technologii a přidání nových účastníků NG-PON2 bez narušení služby pro zákazníky na původních systémech PON [23]. Na obrázku 1.18 je schéma funkce NG-PON2.



Obr. 1.18: Základní topologie NG-PON2 (Upraveno dle: [23, str. 17])

Následuje výčet parametrů, které by mělo NG-PON2 splňovat dle doporučení [24]: Požadavky na systémy NG-PON2 zahrnují podporu:

- TWDM architektura kanálu s více vlnovými délkami,
- 4–8 dvojic kanálů TWDM (každý kanálový pár obsahuje jeden downstream a jeden upstream kanál vlnových délek), konfigurovatelný pro přírůstkový růst počínaje jedním nasazeným (tj. ne všechny páry kanálů musí být aktivní)[24, str. 4].

Nominální rychlosti pro jednotlivé kanály:

- 10 Gbit/s downstream a 10 Gbit/s upstream,
- 10 Gbit/s downstream a 2.5 Gbit/s upstream,
- 2.5 Gbit/s downstream a 2.5 Gbit/s upstream [24, str. 4].

Jako další požadavky se zahrnují:

- dosah pasivních vláken nejméně 40 km a maximální diferenční vzdálenost vláken až 40 km s konfigurovatelnou maximální diferenční délkou vlákna 20 km a volitelně 40 km,
- schopnost dosáhnout 60 km, nejlépe s pasivním vnějším zařízením,
- podpora poměru rozdělení nejméně 1:256.

Systémy NG-PON2 vyžadují flexibilitu pro vyrovnání kompromisů v poměru rychlosti, vzdálenosti a rozdělení pro různé aplikace. Soubor kombinací parametrů, které systém podporuje, musí zahrnout:

- 40 Gbit/s downstream kapacitu a 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- 10 Gbit/s upstream kapacitu a 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- přístup do sítě se špičkovými rychlostmi 10/2.5 Gbit/s downstream/upstream,
- jsou také možné delší vzdálenosti s nižšími poměry dělení [24, str. 4].

Systémy NG-PON2 mohou také podporovat:

- 40 Gbit/s upstream kapacitu s 10 Gbit/s na upstream kanál and 20 km dosah s alespoň 1:64 rozdělením,
- 2.5 Gbit/s na downstream kanál a 2.5 Gbit/s na upstream kanál s 40 km dosah s 1:32 rozdělením,
- 10 Gbit/s na downstream kanál a 10 Gbit/s na upstream kanál s 40 km dosah s 1:32 rozdělením,
- přístup do sítě se špičkovými rychlostmi 10/10 Gbit/s downstream/upstream,
- laditelná WDM typu point-to-point se schopností koexistovat s ostatními systémy PON [24, str. 4].

Systémy NG-PON2 musí být schopny nabízet výrazně více kapacity než současné systémy GPON a XG-PON a musí být schopny alespoň podporovat 40 Gbit/s souhrnné kapacity na vlákne ve směru sestupném a nejméně 10 Gbit/s souhrnné kapacity ve směru vzestupném. Až 160 Gbit/s ve směru downstream a 80 Gbit/s upstream je cílová kapacita kam by se měla specifikace NG-PON2 dostat [24].

Útlumy v trase NG-PON2

Součástí doporučení pro NG-PON2 je tabulka 1.4, ve které jsou třídy s doporučením pro takzvanou útlumovou bilanci. Třída N je definicí pro Nominal (jmenovitá) a třída útlumu E je definicí pro Extended (rozšířená).

Tab. 1.4: Tabulka útlumových tříd NG-PON2

	N1	N2	E1	E2
Min. útlum optické trasy	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Max. útlum optické trasy	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB
Max. diferenční útlum optické trasy	15 dB			

ODN zahrnující zesilovací prvky, slučovače optických signálů nebo rozdělovače s malým útlumem mohou mít útlum menší než je deklarovaná minimální hodnota. V takovém případě musí ODN zajistit opatření (například optickým atenuátorem), aby garantovala minimální optický útlum v dané útlumové třídě, a zajistila tak prevenci degradace BER nebo potenciálnímu poškození přijímače.

Parametry optického přijímače a vysílače pro NG-PON2

V definici ITU-T G989.2 je také popis parametrů pro to, jak by měl vypadat přijímač a vysílač optického signálu. V tabulce 1.5 jsou zmíněné parametry pro sestupný směr při 9,95328 Gbit/s.

Tab. 1.5: Parametry vysílače a přijímače definované v sestupném směru

Vysílač					
	Jednotka	Hodnota			
Nominální rychlost linky	Gbit/s	9,95328			
Vlnová délka – pásmo	nm	1596–1603			
Rozestup mezi kanály	GHz	100			
Linkový kód	–	NRZ			
ODN třída		N1	N2	E1	E2
Průměrný minimální výkon	dBm	3	5	7	9
Průměrný maximální výkon	dBm	7	9	11	11
Přijímač					
Max. odrazivost	dB	–20			
Referenční BER	–	10^{-4}			
Útlumová třída		N1	N2	E1	E2
Min. cit. pro ref. BER	dBm	–28	–28	–28	–28
Max. cit. pro ref. BER	dBm	–7	–7	–7	–9

1.3 Simulační nástroje pro optické sítě

1.3.1 OptSim™

OptSim™ je softwarový nástroj pro návrh a simulace optických komunikačních systémů na úrovni fyzické vrstvy. Díky grafickému rozhraní je velice jednoduché jej používat. OptSim™ poskytuje vysokou přesnost a použitelnost a je ideální pro optické systémy koherentních optických systémů. Poskytuje možnost modulace DPSK a QPSK a dalších. Je vhodný pro DWDM/CWDM s optickými zesilovači jako třeba Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), Ramanův zesilovač a dalšími.

OptSim™ na svých webových stránkách uvádí, že je možné simulovat [25]:

- FTTx/PON, včetně BPON, G(E)PON, WDM-PON, koherentní PON, RSOA obousměrně PON,
- analogový a digitální CATV, radio-over-fiber, mikrovlnné fotonické spoje,
- koherentní optické CDMA,
- elektronická kompenzace disperze (EDC),
- interferometrický vláknový optický gyroskop (iFoG),
- optické bezkabelové spoje (FSO).

Rozhraní s nástroji pro navrhování na úrovni zařízení, jako jsou BeamPROP a LaserMOD, poskytují smíšený návrhový tok pro optoelektronické obvody a systémy. Program také nabízí Matlab rozhraní, díky němuž je jednoduché rozvíjet modelování přes funkce Matlabu a Simulink prostředí. Poskytuje API pro programovací jazyky C/C++ pro rozvoj uživatelských modelů. Simulink již ve výchozí instalaci obsahuje knihovnu předdefinovaných komponent výrobce, která usnadňuje modelování komerčně dostupných zařízení.

V programu je simulace vytvářena pomocí blokového schématu. Každý blok má svojí funkci a signály mezi bloky se vyměňují jako v reálném zapojení. Bloky jsou uloženy v knihovnách, které je možno rozšířit a doprogramovat chování bloků.

Výhodou programu je škálovatelnost zapojení a relativně rychlou změnu parametrů pro simulaci.

Prvky Optsimu

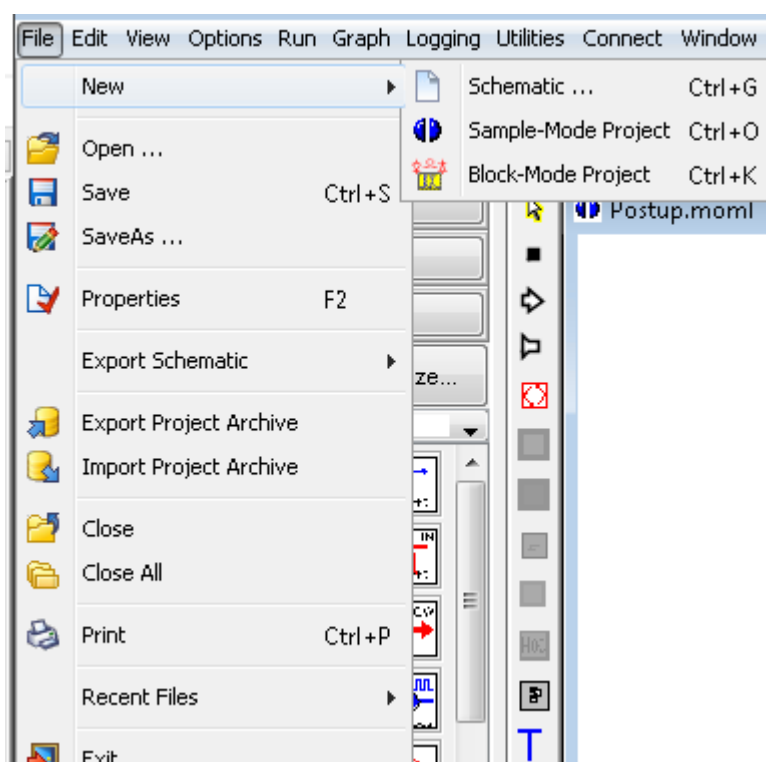
- Generátor bitové posloupnosti - pnseq - je blokem, který generuje náhodnou bitovou posloupnost. Tímto blokem jsou generována data, která jsou přenášena k přijímači.
- Převod do kódu NRZ - recnrz - zde je uskutečněn převod bitové posloupnosti do kódu NRZ. Výstup je elektrickým signálem.
- CW laser.
- VCSEL [26, str. 1].

- Modulátor - Modulátor reaguje na elektrický signál a moduluje jej na optický. Je to blok, který potřebuje pro svoji činnosti jak elektrický signál tak optický z laseru.
- Scope - virtuální měřicí přístroj pro elektrické veličiny.
- Powermeter - opowme - blok, který je měřícím přístrojem pro optický výkon.
- Probe - podobně jako scope, ovšem pro optické veličiny.
- Rx blok - sensitivity_rx - PIN/ APD dioda, přijímač.
- Bessel filter - je filtr pro kompenzaci chromatické disperze na vlákně.

Vytváření simulace v Optsimu

Plátno pro vkládání bloků pro simulaci je vytvořeno následovně: File -> new -> Sample-mode schematic.

Otevře se tabulka s volbou umístění a názvem souboru s příponou .moml (soubor

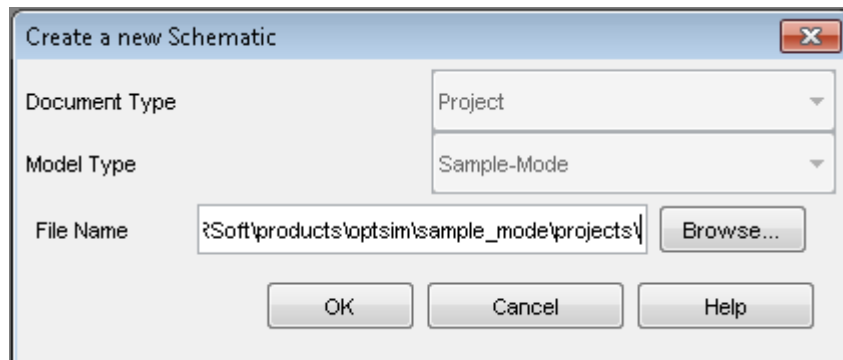


Obr. 1.19: Nové schéma (Zdroj: Vlastní zpracování)

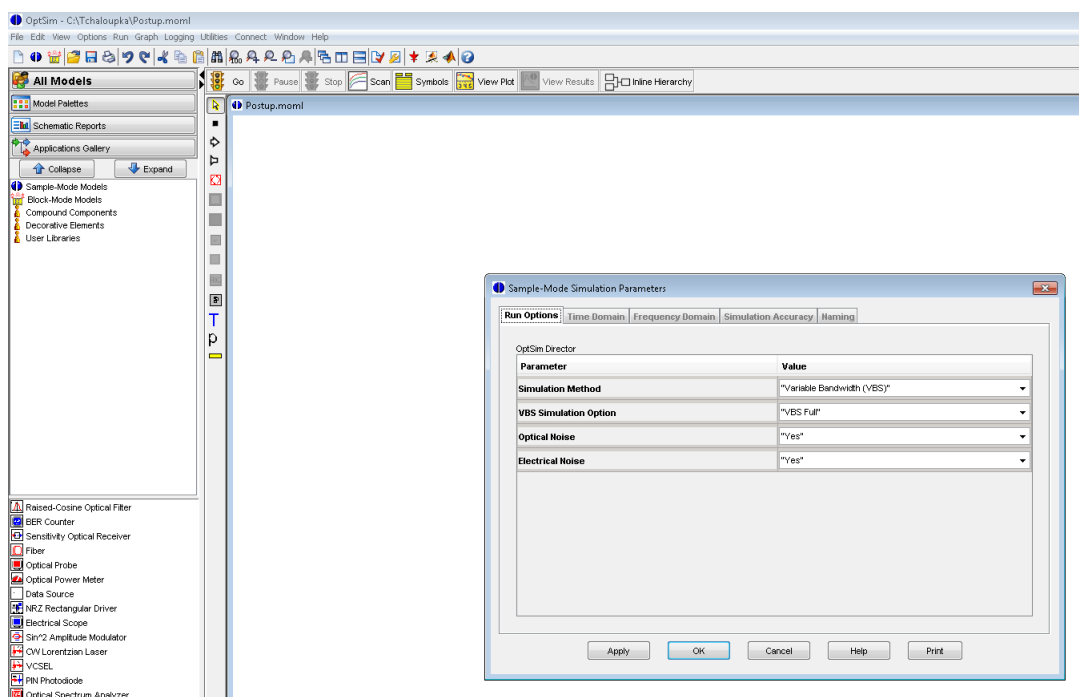
schématu). Po zvolení umístění je nutno volbu potvrdit.

V dalším kroku se otevře schématické plátno překryté volbou parametry simulace, ty lze nastavit později, pokud budeme používat v projektu proměnné (např. refbrt - reference bitrate), které se berou právě z těchto voleb v simulaci.

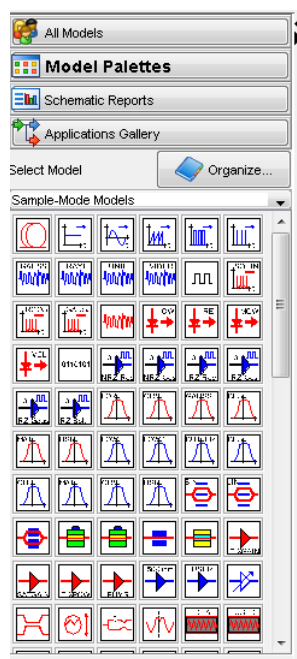
Na obrázku 1.22 je paleta obsahující předdefinované funkční bloky.



Obr. 1.20: Tabulka voleb (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 1.21: Parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 1.22: Paleta v programu OptSim™ (Zdroj: Vlastní zpracování)

1.3.2 PHOTOSS

PHOTOSS je simulační software pro návrh a analýzu spojů z optických vláken a přenosových systémů na fyzické vrstvě. Poskytuje intuitivní grafické uživatelské rozhraní, které usnadňuje nastavení fotonické sítě. Knihovna flexibilních součástí obsahuje velké množství simulačních modelů a předdefinovaných sad parametrů, které lze snadno rozšířit o uživatelsky definované součásti s přizpůsobenými parametry. Poskytuje řadu modelů komponentů s různou úrovní složitosti. Vestavěné programovací rozhraní umožňuje integraci uživatelsky definovaných modelů komponent a simulačních algoritmů s plnou kontrolou jejich příslušných parametrů [27].

Hlavním účelem aplikace PHOTOSS je provádět numerické simulace optických nebo fotonických přenosových systémů. Obecně platí, že simulace těchto systémů zahrnuje souhru mezi základními koncepty za účelem vytvoření přesné emulace skutečného fyzického systému. PHOTOSS je samostatným software a nepotřebuje další simulační framework.

Uživatelské rozhraní umožňuje grafický návrh a analýzu optických systémů umístěním a připojením komponenty na plátnu s mřížkou. Podobně jako u OptSimu je zde předdefinovaná knihovna s komponentami, u kterých lze měnit parametry. Různé komponenty představují modely s různou složitostí.

Fyzické modely umožňují širší náhled do jevů ovlivňujících systém, zatímco behaviorální modely představují jednoduchou adaptaci vlastností komponenty. Za účelem snadnějšího přehledu a správy složitých sestav mohou být komponenty seskupeny

do opakovaně použitelných podsítí, čímž se vytvoří funkční jednotky, jako jsou převodníky vlnových délek, multiplexery s optickými přídavnými funkcemi nebo křížová propojení. Obecně je simulace PHOTOSu uložena v simulačním souboru, který má určený formát – *.pho formát*. Simulační soubor lze načíst, modifikovat, uložit a může být přenesen na libovolný počet počítačů, na kterých je možno tuto simulaci spustit. V závislosti na složitosti a obsahu simulace je nutno kopírovat i další soubory spolu se simulačním souborem.

Každá individuální simulace obsahuje soubor simulačních parametrů, které se vztahují pouze na jeho vlastní rozsah simulace. Samozřejmě, různé simulace mohou mít různé sady parametrů.

Prvky PHOTOSu

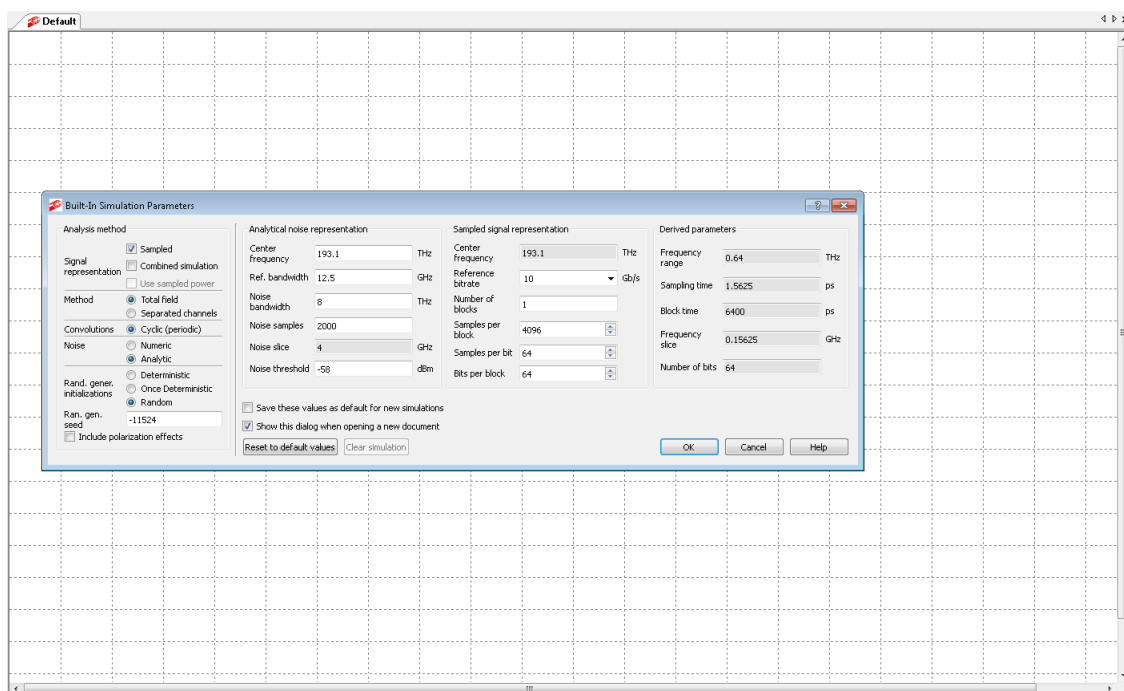
- PulseGenerator – je blokem, který generuje náhodnou bitovou posloupnost a výstupem jsou pulzy v kódu NRZ.
- CWLaser – laser s kontinuálním paprskem.
- Analytical filter – Besselův filtr (dolní propust).
- Modulátor – modulátor reaguje na elektrický signál a moduluje jej na optický. Je to blok, který potřebuje pro svoji činnost jak elektrický signál tak optický z laseru.
- Oscilloscope – virtuální měřicí přístroj pro elektrické veličiny.
- EyeAnalyzer – blok, který je měřícím přístrojem s výstupem diagramu oka.
- NumericalBert – blok pro zjištění BER.
- SpectrumAnalyzer – blok v němž je výstup zaznamenáván jako data pro grafickou analýzu.
- PinDiode – PIN/APD dioda, přijímač.
- SMF – jednovlákenné vlákno.

Vytváření simulace v PHOTOSu

Podobně jako v OptSimu je zde určitá podobnost při vytváření schémat. V základním pohledu je zde kreslící plátno s mřížkou, do které se ukládají funkční bloky. Jejich spojení se uskutečňuje přes kliknutí na počáteční blok a na koncový, který je třeba spojit. Stejně jako v OptSimu je zde rozlišováno elektrické a optické spojení. Proto po vložení bloku na plátno je nutno nejdříve nastavit (pokud to blok dovozuje) jeho elektrické nebo optické chování. Například PulseGenerator lze již nastavit tak, aby vysílal NRZ pulzy v optickém signálu (v testovací topologii bylo vyzkoušeno oboje zapojení - jak rozdělení na laser, filter, generátor, modulátor, tak jen PulseGenerator). Tyto zapojení se liší množstvím možností k nastavení. Proto byla zvolena rozložená možnost, aby byl co nejvíce eliminován rozdíl vůči simulaci v OptSimu.

Nové schéma vytvoříme přes File -> new -> New Simulation. Tímto vytvoříme plátno pro vkládání bloků pro simulaci.

V dalším kroku 1.23 se otevře schématické plátno překryté volbou parametry simulace nastavíme Noise na numeric a zbytek zvolíme dle požadovaných parametrů. V testovací topologii tyto parametry byly nechány ve výchozím nastavení, jen změněna bitrate na 10 Gbit/s.

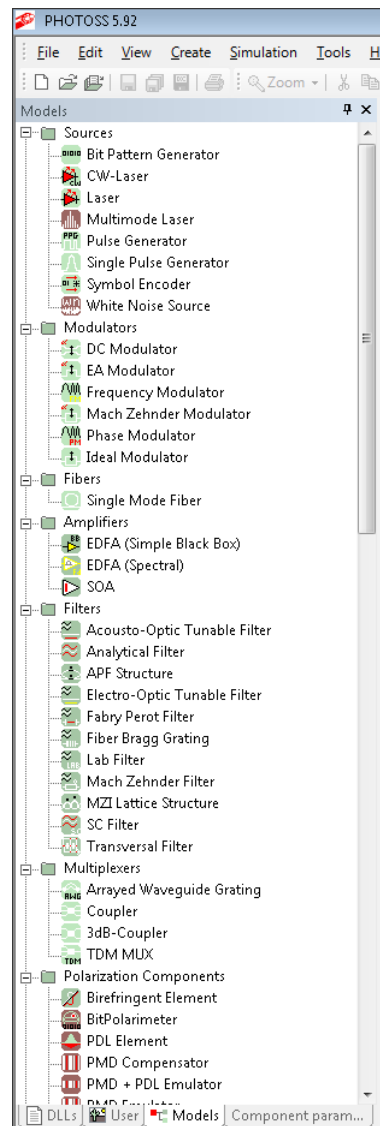


Obr. 1.23: Nové schéma s parametry simulace (Zdroj: Vlastní zpracování)

Na obrázku 1.24 je paleta obsahující předdefinované funkční bloky. V paletě jsou různá rozdělení pro bloky simulace, zde je vypsáno rozdělení s bloky použitými v simulaci:

- Sources – CW laser, Pulse Generátor,
- Modulators – Mach Zehnder Modulátor,
- Fibers – Single Mode Fiber,
- Amplifiers,
- Filters – Analytical Filter,
- Multiplexers,
- Polarization Components,
- Receivers – Eye Analyzer, Numerical BERT, Oscilloscope, PIN Photodiode, Spectrum Analyzer,
- Additional Components,
- Digital Signal Processing,
- Programming,

- Management,
- Equalizers,
- Multimode and Multicore,
- Testing Equipment.



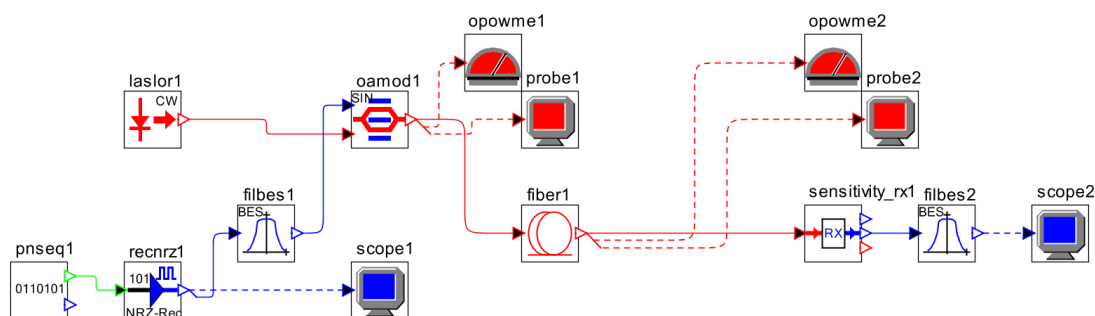
Obr. 1.24: Paleta v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

2 Vytvoření testovací topologie

2.1 OptSimTM

V OptSimu byl vytvořen testovací model jednoduchého vysílače a přijímače, který má na vstupu náhodnou bitovou posloupnost. Ta je převedena do kódu NRZ a odešlána do amplitudového modulátoru, který moduluje signál z laseru – zdroje optického signálu a přivedené bitové posloupnosti v kódování NRZ. Signál je vyslán do optického vlákna na jehož konci čeká optický přijímač. Na vstupu i na výstupu je blok *scope*, který je pomyslným osciloskopem, a zaznamenává průběhy signálů. Na začátek a na konec optického vlákna je vložen měřič optického výkonu pro zjištění výkonu na začátku a na konci optické trasy.

Testovací topologie byla vytvořena dle následujícího schématu:

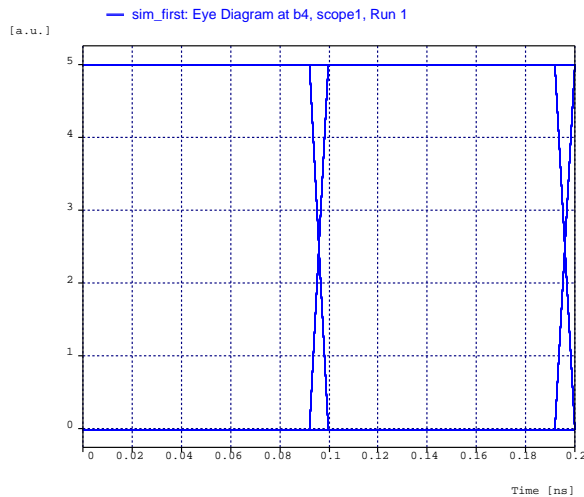


Obr. 2.1: Testovací topologie (Zdroj: Vlastní zpracování)

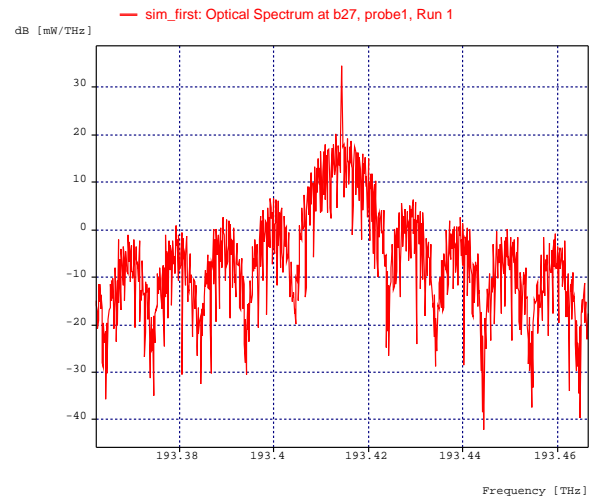
Parametry pro různé délky byly nastaveny:

- vysílací výkon laseru 3mW, vlnová délka 1550 nm,
- přenosová rychlost 10 Gbit/s,
- vlákno 0,25 dB/km, chromatickou disperzi 16,0 ps/nm/km,
- útlum modulátoru 3 dB.

V testovací topologii byla zvolena délka 1 km a 10 km. Na obrázku 2.2 je spektrum na začátku vlákna a diagram oka pro vstupní signál.



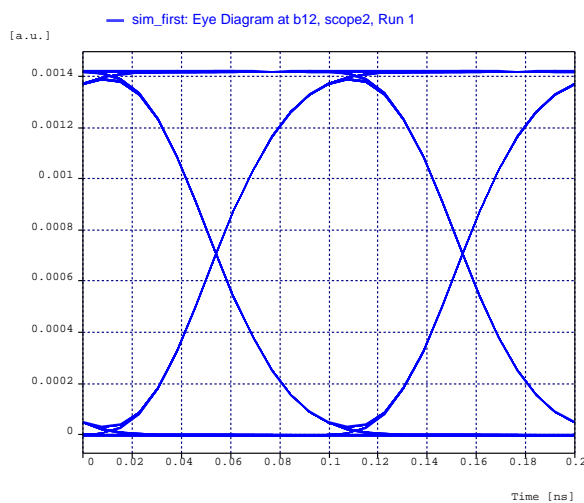
(a) Oko výstup z PG



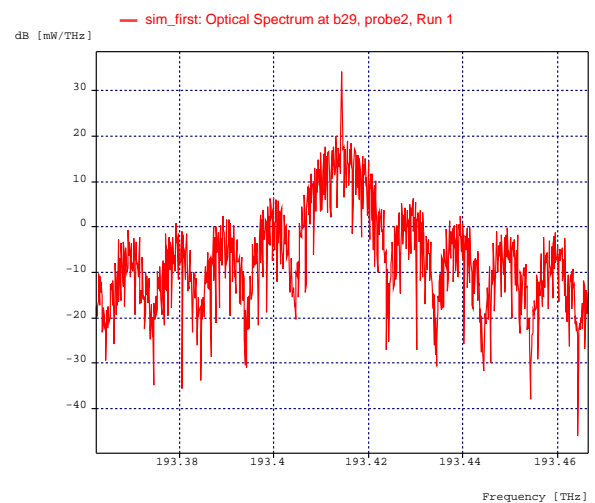
(b) Spektrum na začátku trasy

Obr. 2.2: Grafy pro topologií - začátek vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

2.1.1 Délka 1 km



(a) Diagram oka 1 km



(b) Spektrum na konci trasy 1 km

Obr. 2.3: Grafy pro topologií s 1 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,167$
- $Power[mW] = 0,764E + 00$

Q hodnota 100 [lin], Q = 40,00 [dB]

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -1,420$

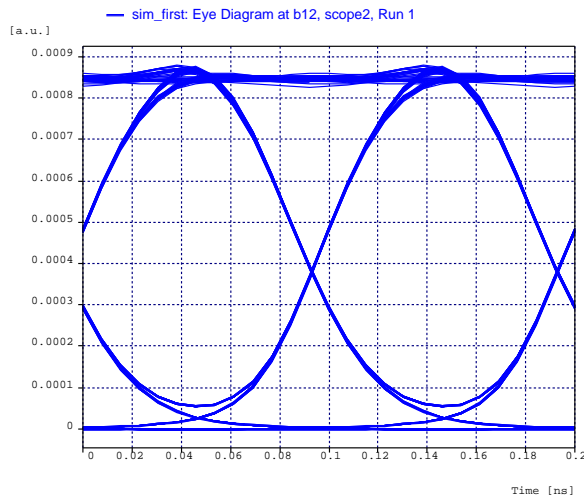
- $Power[mW] = 0,721E + 00$

Q hodnota 37,3509 [lin], $Q = 31,446015$ [dB].

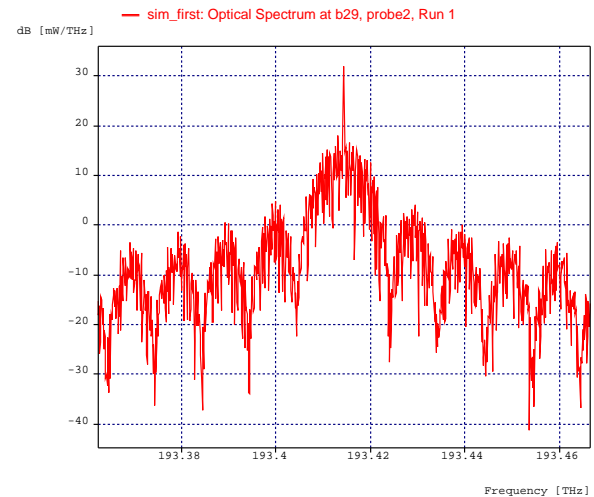
Výsledné odečtené BER 10^{-40} na obou stranách.

Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{37,3509}{\sqrt{2}}) = 1,267 \times 10^{-305}$.

2.1.2 Délka 10 km



(a) Diagram oka 10km



(b) Spektrum na konci trasy 10 km

Obr. 2.4: Grafy pro topologií s 10 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,150$
- $Power[mW] = 0,767E + 00$

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -3,673$
- $Power[mW] = 0,429E + 00$

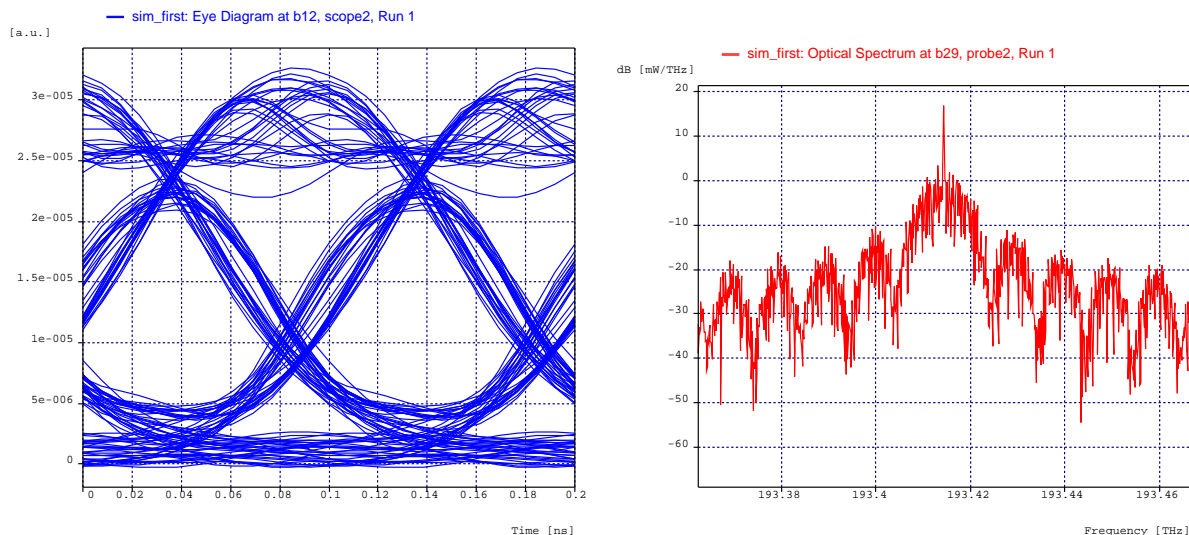
Q hodnota 33,8535 [lin], $Q = 30,592081$ [dB].

Výsledné odečtené BER 10^{-40} na obou stranách.

Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{33,8535}{\sqrt{2}}) = 1,81459 \times 10^{-251}$.

2.1.3 Maximální délky stanovených parametrů

Pro maximální délku přenosu byla určena hodnota BER pod kterou nesmí přenos poklesnout. Pro tuto topologii bylo určeno BER 10^{-14} . Dle základních parametrů bylo experimentálně nastavována délka a z výsledků byly porovnávány parametry přenosu dle BER. Této hodnotě se měření přiblížilo na 71. kilometru vlákna.



(a) Diagram oka 71 km

(b) Spektrum na konci trasy 71 km

Obr. 2.5: Grafy pro topologií se 71 km vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- $Power[dBm] = -1,320$
- $Power[mW] = 0,738E + 00$

Na konci vlákna z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 2:

- $Power[dBm] = -18,993$
- $Power[mW] = 0,126E - 01$

Q hodnota 8,19223 [lin], $Q = 18,268040$ [dB].

Naměřené BER na konci trasy: $2,05688 \times 10^{-14}$.

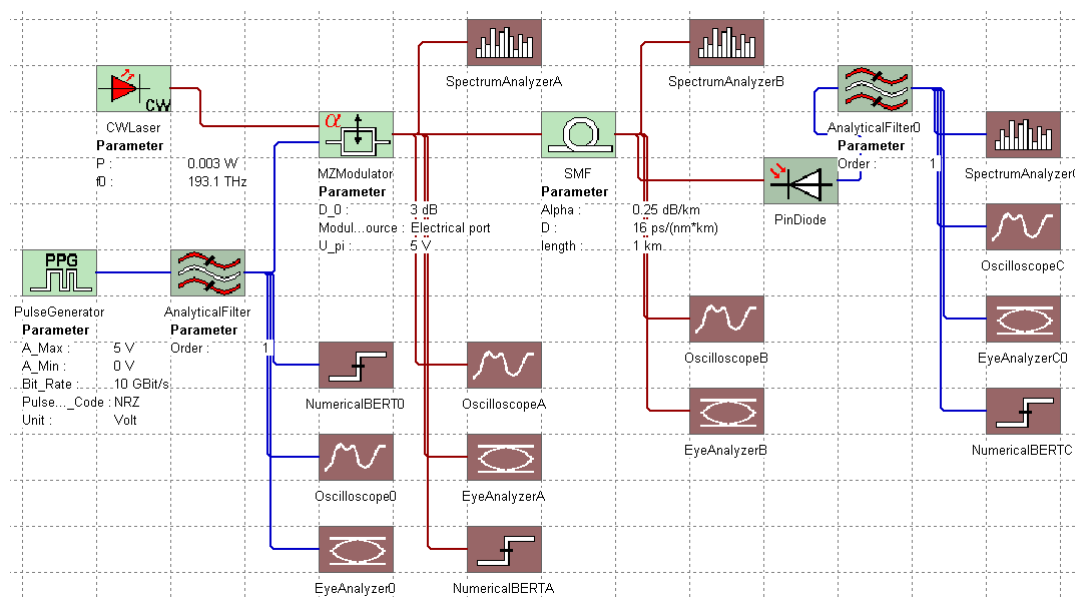
Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{8,19223}{\sqrt{2}}\right) = 1,28215 \times 10^{-16}$.

2.2 PHOTOSS

V programu PHOTOSS byl vytvořen podobně jako OptSimu model vysílače a přijímače. Na vstupu je generátor pulsů, který generuje bitovou posloupnost, kterou zároveň převede do kódu NRZ. Pro odstranění záskmitů je výstup veden do analytického filtru, ze kterého je získáván signál, který je pro simulaci výchozí. NumericalBERT je přístrojem, který vyžaduje předřazení filtru pro svojí činnost (programové omezení). Modulátor přijímá signál z CWLaseru a výstupu z filtru, který moduluje dle elektrického signálu. Výstup směřuje do optického vlákna, přes které je přenesen na vstup PIN diody.

Jako tomu bylo u OptSimu, i zde na začátku a na konci optické trasy bylo třeba měřit výstupní výkon a spektrální charakteristiku optického impulsu.

Testovací topologie byla vytvořena dle následujícího schématu:



Obr. 2.6: Testovací topologie v programu PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Parametry pro různé délky byly nastaveny:

- vysílací výkon laseru 3 mW, výstupní frekvence 193,1 THz,
- přenosová rychlost 10 Gbit/s,
- vlákno 0,25 dB/km, Chromatickou disperzi 16,0 ps/nm/km,
- útlum modulátoru 3 dB.

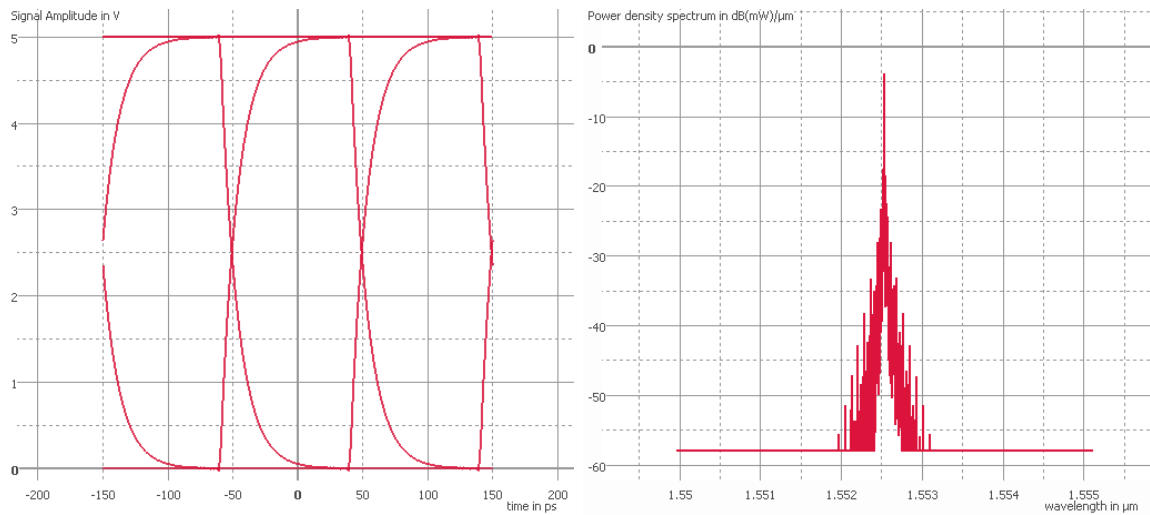
Na rozdíl od OptSimu bylo třeba nastavit další parametry zařízení:

- CWLaser: $P = 0,003 \text{ W}$, $f_0 = 193,1 \text{ THz}$.
- PulseGenerátor: $A_Max = 5 \text{ V}$, $A_Min = 0 \text{ V}$, $Bit_Rate = 10 \text{ Gbit}$, $Pulse_Code = \text{NRZ}$, $Unit = \text{Volt}$.

- MZModulátor: útlum 3 dB, ModulationSource = Electrical port, $U_{pi} = 5V$.
- AnalyticalFilter Order = 1.
- SMF: Alpha 0,25 dB/km, 16 ps/(nm × km).
- Length = 1 km. (Dále se bude upravovat)

Z důvodu nutnosti použití více měřicích přístrojů bylo nutno označit je dle následujícího suffixu:

- PRVEK0 – prvek měřící parametry před modulátorem,
- PRVEKA – prvek měřící parametry na začátku optické trasy – výstup z modulátoru,
- PRVEKB – prvek měřící parametry na konci optické trasy – konec optického vlákna,
- PRVEKC – prvek měřící parametry na výstupu z PIN diody.

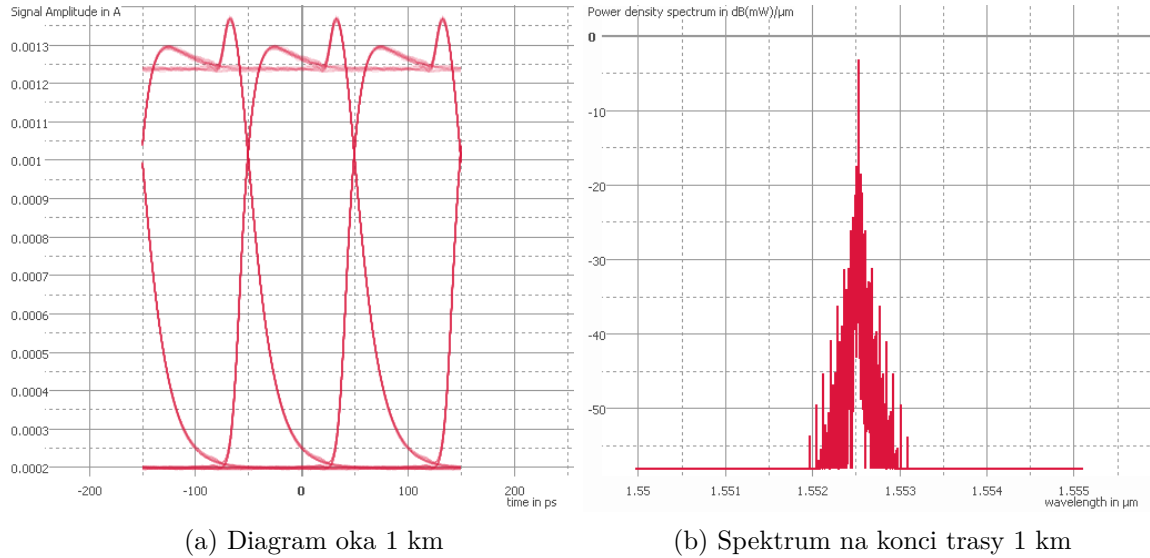


(a) Oko výstup z PG

(b) Spektrum na začátku trasy

Obr. 2.7: Grafy pro topologii - začátek vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

2.2.1 Délka 1 km



Obr. 2.8: Grafy pro topologii s 1 km vlákna PHOTOSS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

BER hodnotu nelze vypočíst.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 1,541015$

NumericalBERTC: Q hodnota 23,064776.

Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{23,064776}{\sqrt{2}}) = 5,227739 \times 10^{-118}$.

2.2.2 Délka 10 km

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

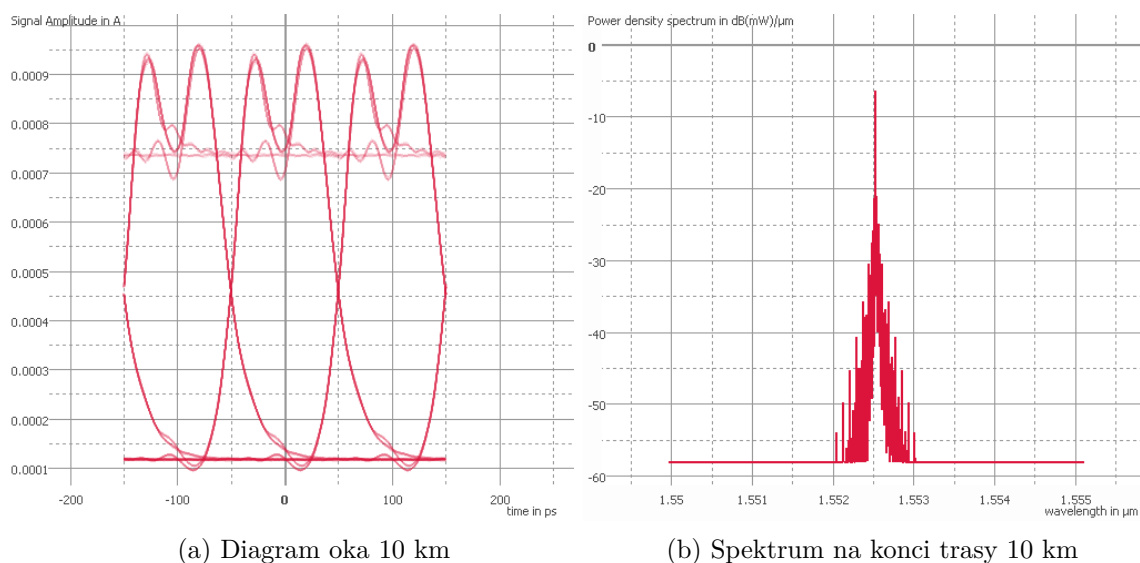
BER hodnotu nelze vypočíst.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 1,154365$

NumericalBERTC: Q hodnota 16,719224.

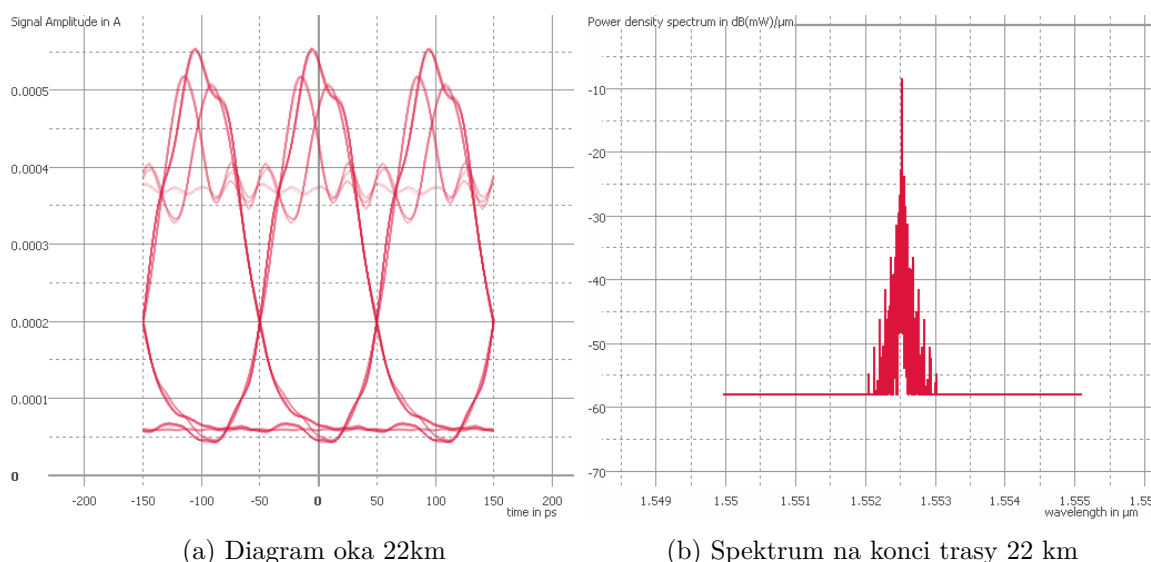
Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{16,719224}{\sqrt{2}}) = 4,747374 \times 10^{-63}$.



Obr. 2.9: Grafy pro topologii s 10 km vlákna PHOTOS (Zdroj: Vlastní zpracování)

2.2.3 Maximální délky stanovených parametrů

Pro porovnání s programem OptSimTM jsem převzal co nejpodobnější parametry, taktéž pro tuto topologii bylo určeno BER 10^{-14} . Dle základních parametrů bylo experimentálně nastavována délka a z výsledků byly porovnávány parametry přenosu dle BER. Této hodnotě jsem se přiblížil na 22. kilometru vlákna.



Obr. 2.10: Grafy pro topologií se 22 km vlákna PHOTOS (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z osciloskopu s označením A:

- $Power[mW] = 1,503560$

NumericalBERTA: Q hodnota QNAN.

BER hodnotu nelze vypočíst.

Na konci vlákna z osciloskopu s označením B:

- $Power[mW] = 6,336346 \times 10^{-1}$

NumericalBERTC: Q hodnota 7,6574598.

Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{7,6574598}{\sqrt{2}}) = 9,48233 \times 10^{-15}$.

3 Vyhodnocení výsledků testovací topologie

3.1 OptSimTM

Testovací topologie, jak již název napovídá, slouží k otestování a sblížení se s programy. V otestované topologii je zvolen velmi výkonný laser a dále ideální trasa bez dalších útlumů (spoje, sváry, atd.). To způsobilo, že topologie pro 1 km a 10 km má relativně stejné vlastnosti přenosu. Dále proběhl experimentální test dosahu této jednoduché topologie s výsledkem délky 71 km. Za největší výhody programu považuji možnost upravit graf a exportovat obrázky do vektorové grafiky. Při kontrole výsledků jsem narazil na chybu programu OptSimTM. Jednalo se o zobrazení BER z diagramu oka přes osciloskop, které při 1 km i při 10 km bylo stejné a po dosazení do vzorce 1.3 by mělo při 1 km vyjít zhruba $1,267 \times 10^{-305}$ a při 10 km $1,81459 \times 10^{-251}$. Tato chyba by mohla znamenat, že OptSimTM nepřipouští menší chybovost, nebo není při této hodnotě již relevantní. Odchytky od naměřených hodnot s vypočtenými jsou více než znatelné.

3.2 PHOTOSS

Jako výhodu PHOTOSSu je možné brát bloky s komplexnější nastavováním nebo lze idealizovat pomocí vložení přímo ideálních komponent za cenu absence možnosti nastavit některé parametry. Za problém považuji neintuitivní a nepřesné ovládání. Spojování bloků se nemusí podařit na první kliknutí. Nebo například OptSimTM má předdefinované běžně využívané globální proměnné, ale do PHOTOSSu je nutno proměnné nejdříve nadefinovat a až pak je lze využívat. Například při nastavování přenosové rychlosti jsou měřicí prvky rozštěpené dle měřených veličin. Jeden z výše zmíněných problémů je, že z EyeAnalyzeru nelze odečíst Q-faktor, ten je možno odečíst pouze z přístroje NumericalBERT. SpektrumAnalyzer má dle chování vykazovat měření výkonu na začátku a na konci trasy. Výstupem byly hodnoty QNAN, tyto parametry bylo nutno odečíst z osciloskopu jako maximální hodnotu výkonu.

S hodnotami QNAN, INF a IND je možno setkat se v programu často, a to dle manuálu ze tří důvodů [28]:

- Simulace ještě neproběhla, nebo byla vyčištěna. Výsledek nebyl ještě spočítán, nebo byl vyčištěn.
- Tlačítko „Clear Promptly“ bylo aktivováno na komponentě. To způsobilo vymazání.
- Komponenta nemohla spočítat validní integer, nebo double hodnotu. Toto může být způsobeno například při velkém zkreslení signálu, kdy otevření oka

na přijímači nemohlo být spočteno, nebo numerická optimalizace nemohla konvergovat do stabilního výsledku.

U programu PHOTOSS bylo nutno dopočítávat BER z Q faktoru dle vzorce 1.3. Pro délku 1 km vypočtená chybovost byla $5,227739 \times 10^{-118}$, pro 10 km $4,747374 \times 10^{-63}$. Tyto hodnoty jsou oproti OptSimu výrazně nižší. Rozdíl může být způsobem rozdíly v matematických modelech simulací nebo chybně nastavenými parametry simulace.

3.3 Shrnutí

Program PHOTOSS na podobné topologii dokázal přenést signál na výrazně menší vzdálenost. Toto může být způsobeno použitím jiného algoritmu pro vykonání simulace nebo matematických modelů implementovaných bloků. U PHOTOSSu je například i rozdílný počáteční výkon na začátku trasy. Přičemž útlumy z modulátorů byly nastaveny stejně pro oba programy. U délky 1 km je optický výkon na konci trasy o 0,04 mW vyšší než na začátku trasy. Nelze popsat proč k takovému výsledku došlo.

4 Návrh laboratorních úloh

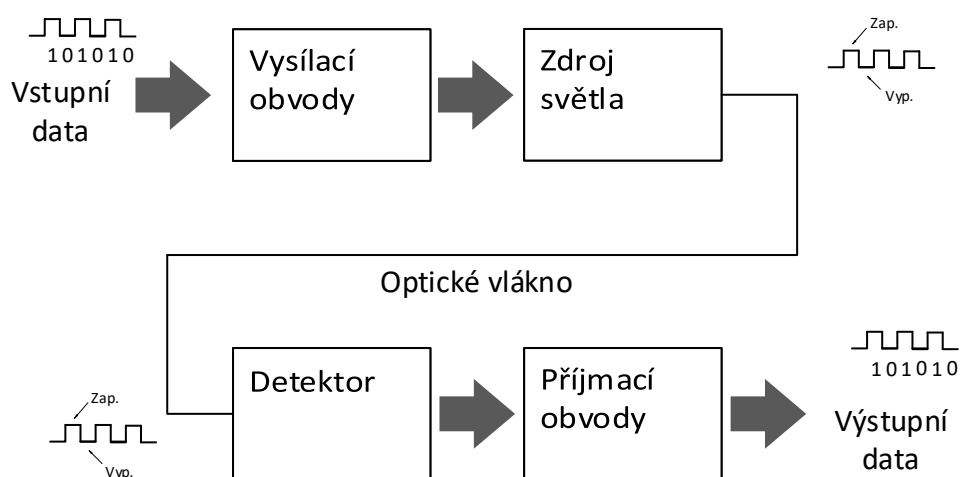
4.1 Simulace přístupové sítě

4.1.1 Cíle úlohy

1. Seznámit se s prostředím OptSim a PHOTOS.
2. Získat teoretické znalosti o prvcích tvořících optickou síť.
3. Analyzovat získané výsledky.

4.1.2 Teoretický úvod

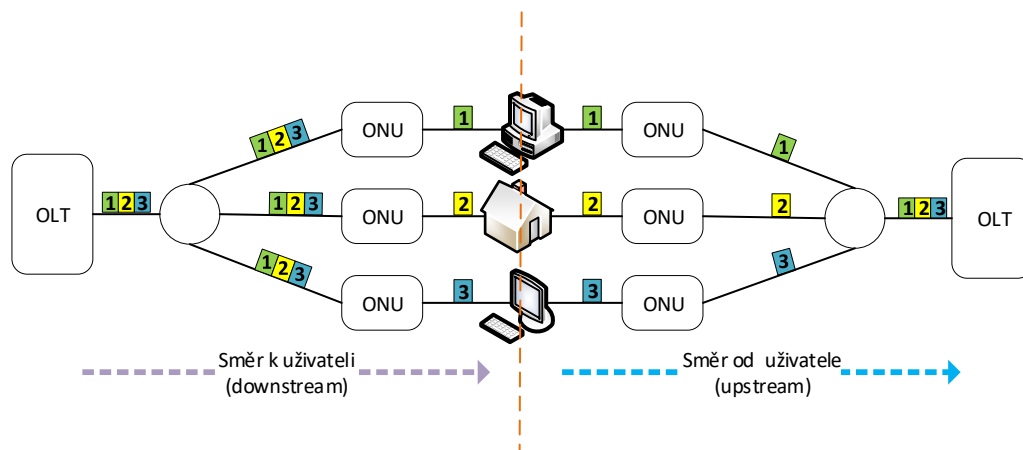
Optický komunikační systém většinou obsahuje tři hlavní komponenty: optický vysílač, vlákno pro přenos optického signálu a optický přijímač. Optický vysílač převádí elektrický signál na optický. Ten je vyslán po vlákne do přijímače, který překonvertuje optický signál na elektrický. Nejběžnější vysílače jsou LED nebo LD (laserové diody). Optická vlákna jsou použita jako médium pro telekomunikace kvůli jejich schopnosti vést signál na dlouhé vzdálenosti. Optický přijímač je tvořen optickým detektorem (fotodioda, fototranzistor), který za použití fotoelektrického jevu převádí světelný signál na elektrický.



Obr. 4.1: Schéma přenosu (Převzato a upraveno z [1])

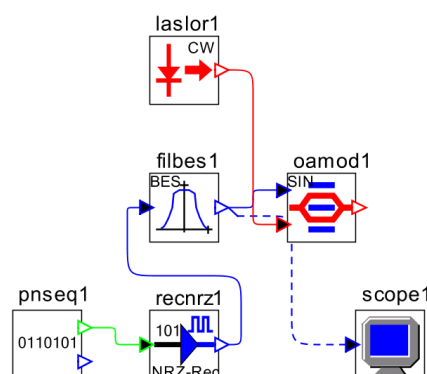
Pasivní optická síť je typ optické sítě, která používá prvky, ve kterých není nutno použít další zdroj elektrické energie. PON sítě jsou P2M (Point-to-multipoint) a pracují výhradně na technologii TDMA. To znamená, že z výchozího bodu je připojeno

větší množství uživatelů. Vstupní médium je sdílenou součástí trasy pro poskytovanou službu. V této trase se používají pouze pasivní prvky – nejčastěji rozbočovače na splnění požadavku připojení více klientů, aniž by bylo třeba využít zesilovačů či jinou úpravu optického signálu. Z tohoto důvodu není dosah tak velký jak u AON. U PON je to mezi 10–20 km. OLT (Optical Line Termination) je výchozí prvek přístupové



Obr. 4.2: PON topologie (Vlastní zpracování dle [5, str. 52])

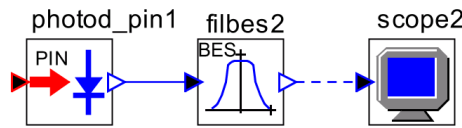
sítě, tzv. centrální jednotka. Tento prvek je přechodným prvkem mezi přístupovou sítí a páteřní sítí. Nejčastěji L2/L3 switch v PON systému. Hlavní funkcí OLT je řízení toku informací skrze ODN. Informace z OLT putují směry k uživateli downstream a od uživatele upstream. Způsob fungování ODN je zobrazen na obrázku 4.2. Implementace OLT je zobrazena na obr 4.3.



Obr. 4.3: Implementace OLT v OptSim™

ONU (Optical Network Unit) je koncový prvek, který převádí elektrické signály na optické. Lze si takové zařízení představit jako router s optickým WAN portem.

ONU je tedy zařízením pro připojení například domácnosti k poskytovateli. Způsob jakým je implementován ONU v OptSimTM je zobrazen na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Implementace ONU v OptSimTM

ONT (Optical Network Termination), neboli koncový terminál uživatele, funkcí vyjadřuje to samé jako ONU. Rozdílem je značení - ITU-T používá označení ONT, IEEE naopak ONU. Oboje je tedy zařízením u uživatele. Jak ONU tak ONT jsou prvky, které na straně uživatele (klienta) převádí optický signál na elektrický a pomocí strukturované kabeláže nebo bezdrátového připojení vytváří možnost připojování klientů do sítě. ODN (Optical Distribution Network) je nedílnou součástí systému PON a jedná se o přenosové médium mezi ONU a OLT. Součástí jsou konektory, optický kabel a sváry.

4.1.3 Analýza výsledků

Abychom byli schopní analyzovat výsledky, je potřeba odčítat hodnoty z jednotlivých osciloskopů v obou programech. Důležité jsou hodnoty signálů na vstupu i výstupu a jejich změny. Pro zhodnocení kvality přenosu signálu se využívá hodnota výkonu optického signálu, BER, diagram oka a Q faktor.

Q faktor

V diagramu oka Q faktor určuje kvalitu a značí optimální rozhodovací úroveň. Dále z něj lze vypočítat bitovou chybovost přenosu přes médium.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{Q}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) [-] \quad (4.1)$$

Vzorec 4.1 byl převzat z [11]. Kde Q je Q faktor a erf je Gaussova chybová funkce, erfc je doplňková chybová funkce.

Z Q faktoru je dále možné zjistit i hodnotu SNR optického signálu. Q faktor je rozdílem mezi průměrnými hodnotami úrovní signálů pro hodnoty logické '1' a '0' (ve vzorci vyjádřeno jako μ_0 a μ_1) a poděleno součtem hodnot šumu. Vlastní Q faktor lze vyjádřit vztahem [12]:

$$Q = \frac{\mu_0 - \mu_1}{\sigma_1 + \sigma_0} [-] \quad (4.2)$$

Kde:

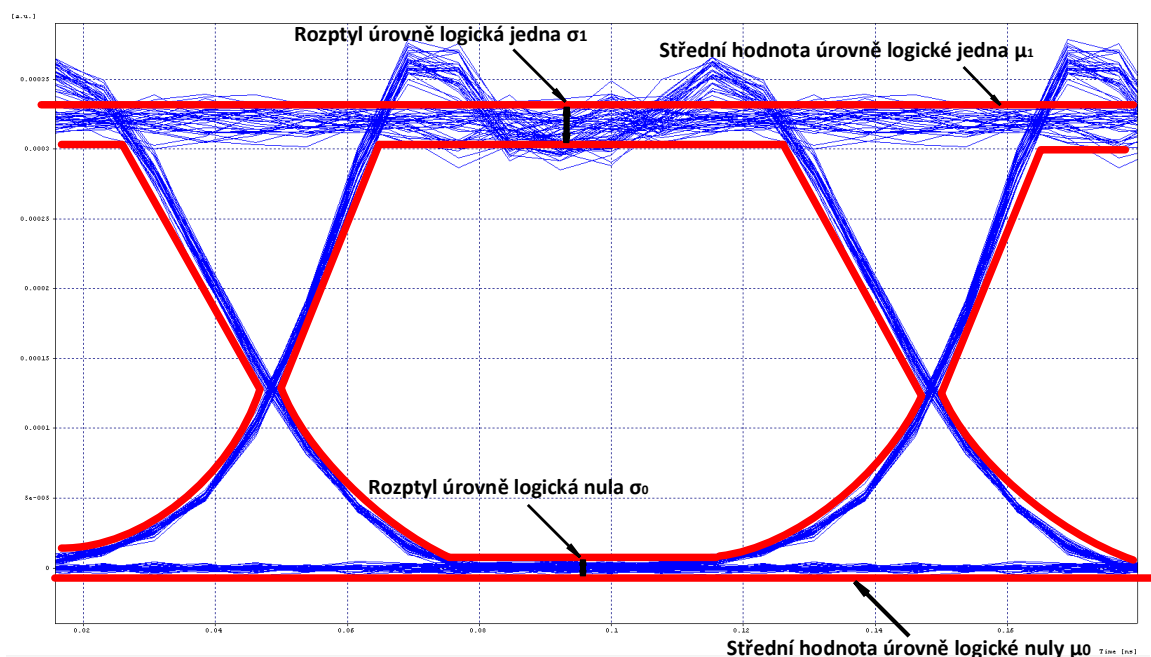
μ_0 – střední hodnota úrovně logické nuly,

μ_1 – střední hodnota úrovně logické jedna,

σ_0 – rozptyl hodnot úrovně logická nula,

σ_1 – rozptyl hodnot úrovně logická jedna.

Detailně zobrazuje obrázek 1.7:



Obr. 4.5: Diagram oka (Zdroj: Vlastní zpracování)

Chybovost BER - bit error rate

BER definuje chybovost při přenosu a je vyjádřena jako poměr mezi počtem chyb z celkového počtu bitů v přenosu. Je tedy vyjádřena jako [10]:

$$BER = \frac{N_e}{N_c} [-] \quad (4.3)$$

kde N_e je rovno počtu chybných bitů a N_c celkovému počtu bitů v přenosu.

BER je bezrozměrná veličina. Bitová chybovost může být alternativně vyjádřena v čase. Celkový počet bitů v přenosu lze vyjádřit vynásobením přenosové rychlosti časem. Při předpokladu chybovosti BER 10^{-12} po dosazení do vzorce 1.2 vyjde, že to je jeden bit ze 10^{-12} bitů. Pro lepší názornost byla připravena tabulka 1.1 s rychlostmi 0.1, 1, 10, 40 a 100 Gbit/s.

Po dosazení do vzorce:

$$BER = \frac{N_e}{V_{p.t}} [-] \quad (4.4)$$

kde V_p je přenosová rychlost, zjistíme t , neboli čas ve kterém se vyskytne jeden chybný bit. Proto je třeba dbát na velmi nízkou chybovost při vyšších přenosových rychlostech. $N_e = 1$, $BER = 10^{-6}$, $V_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$.

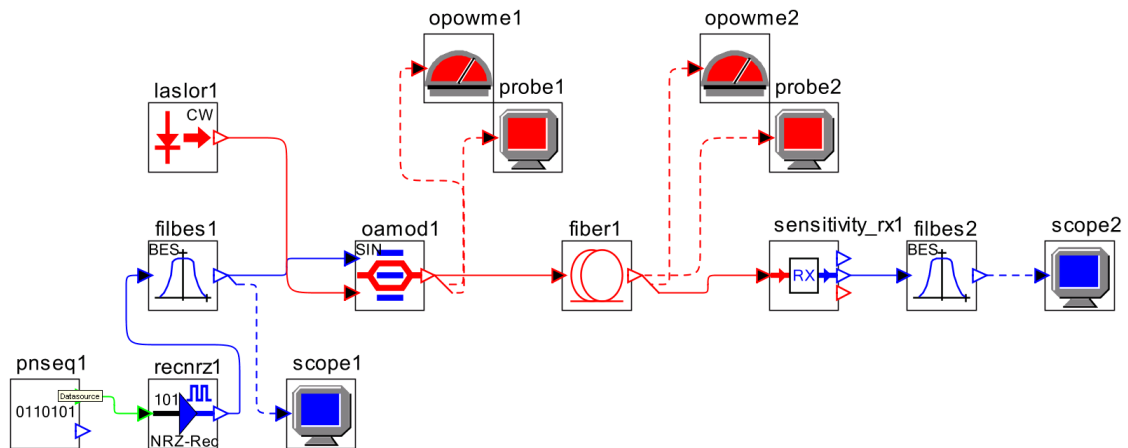
Tab. 4.1: Tabulka chybovosti v čase (Zdroj: Vlastní zpracování)

Přenosová rychlost [Gbit/s]	Bitová chybovost [-]		
	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
0,1	1 s	1000 s	277,78 dní
1	1 ms	1s	1000 s
10	100 μ s	100 ms	100 s
40	25 μ s	25 ms	25 s
100	10 μ s	10 ms	10 s

Ke zlepšení přenosových vlastností a snížení BER lze „použít kódování s dopředným potlačením chyb (FEC), jeho principem je přidání redundantních bajtů do sledu vysílaných dat, což umožní detekci a opravu určitého počtu chyb v přijímači. Redundantní bajty tvoří pouze zlomek vysílaných dat.“ [10, str. 85]

4.1.4 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte zapojení odpovídající 10G pasivní optické síti a zaměřte se na základní parametry optického přenosu: útlum trasy, měrný útlum vlákna, bitová chybovost, vliv dělicího poměru na bitovou chybovost apod.



Obr. 4.6: Topologie v úloze 1

File -> New -> Sample-mode project. Potvrďte umístění projektu.

V parametrech simulace nastavte:

- Referenční rychlost (reference bitrate) 10 Gbit a potvrďte. OptSim™ tuto hodnotu nyní využívá jako refbrt, která se automaticky propíše do všech prvků, které bitrate nastavení vyžadují.

Otazník přes blok znamená, že nejsou zadány parametry daného bloku. Je nutno nastavit prvky. Pokud není prvek zmíněn, ponechte výchozí nastavení (stačí odklepnout ok).

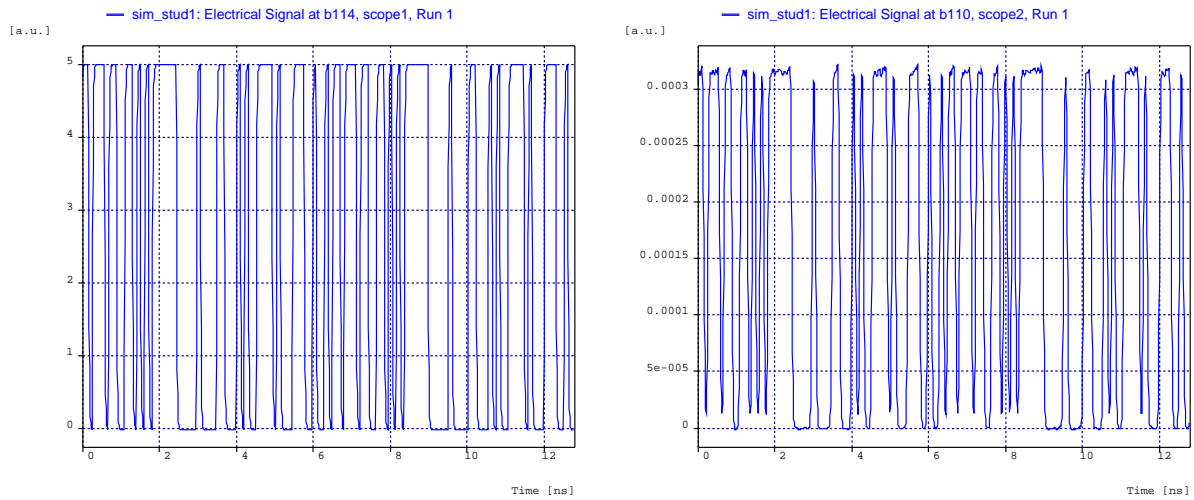
Rozklikněte Model Palettes a vkládejte prvky dle schématu:

- data source, NRZ rectangular driver, \sin^2 amplitude modulator, 2x Besselův filtr, 2x probe, fiber, 2x optical power meter, cw Lorentzian laser, sensitivity optical receiver.
- Délku vlákna nastavte na 10 km.
- Ostatní nastavení prvků nechte vše výchozí.

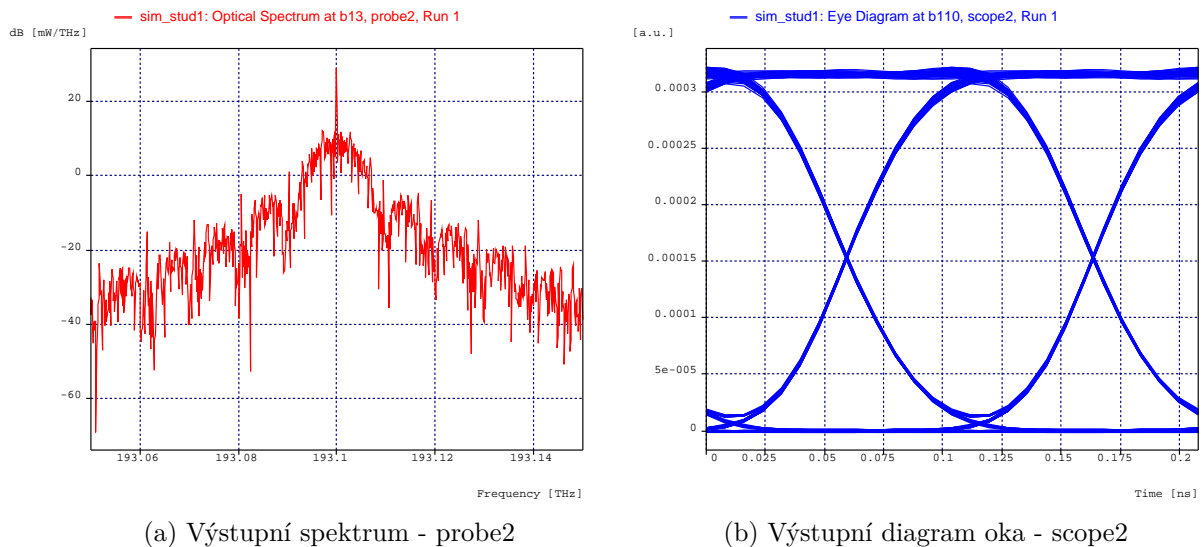
Spuštění simulace se provádí přes tlačítko „GO“ v horní liště. „Start single run“ spustí simulaci. Nyní projděte výstupy z měřících přístrojů. Ty lze zobrazit kliknutím pravým tlačítkem myši na blok měřícího přístroje a zvolit požadovaný výsledek. Například u bloku Scope lze zobrazit elektrický signál a diagram oka.

4.1.5 Výsledky OptSim™

Na obrázcích 4.7 je vidět jak vypadá NRZ signál na straně vysílače a přijímače. Signál má celkově vyšší kvalitu což je znázorněno na obrázku diagramu oka 4.8:



Obr. 4.7: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 4.8: Výstupní signál oko a optické spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

- Power [dBm] = -5,928
- Power [mW] = 0,255E+00

Výsledky z měřicích přístrojů optického výkonu číslo 1:

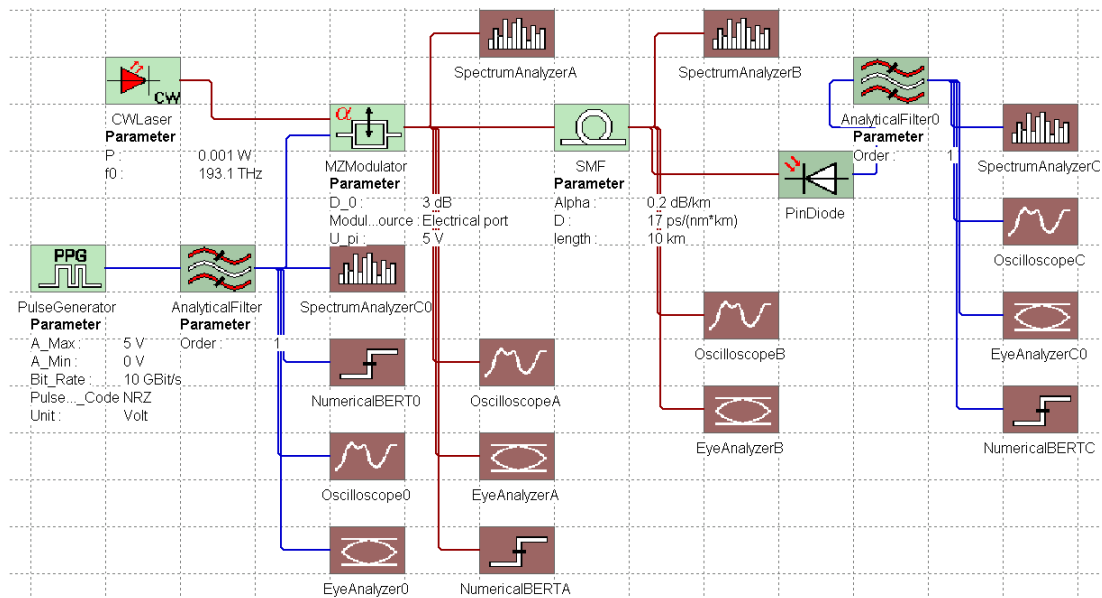
- Power [dBm] = -7,975
- Power [mW] = 0,159E+00

Z měřicího přístroje Scope2 byly odečteny tyto hodnoty: $BER = 1e^{-40}$, $Q = 38,9426$ [lin], $Q = 31,8085$ [dB]

4.1.6 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

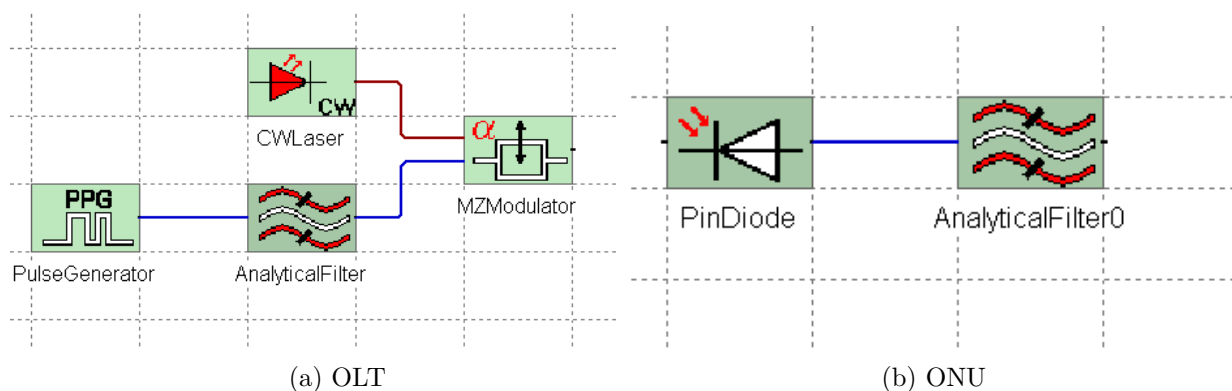
Otevřte program PHOTOSS. File -> New -> New simulation. Při vytváření simulace v okně nastavte tyto parametry:

- Center frequency 193,1 THz,
- Ref band 100 GHz,
- Bitrate 10Gbit/s.



Obr. 4.9: Topologie v programu PHOTOSS

Implementace OLT a ONU v programu photoss je zobrazeno na obrázku 4.10.



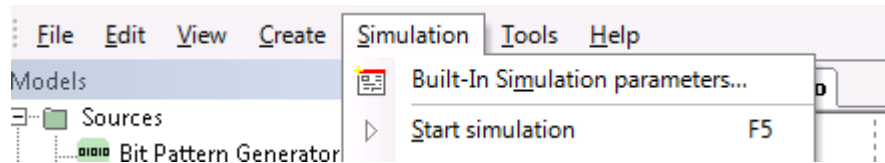
Obr. 4.10: Implementace OLT a ONU v PHOTOSS

Vložte následující prvky a nastavte jim parametry:

- CWLaser: $P = 0,001 \text{ W}$, $f_0 = 193,1 \text{ THz}$,
- Pulse Gen: Unit Volt, $A_Max = 5\text{V}$, $A_Min = 0\text{V}$, $Bit_Rate = 10\text{Gbit}$,
- MZModulator: $U_0 = 0\text{V}$, $U_{PI} = 5\text{V}$, Modulation Source Electrical port,

- $SMF = 10 \text{ km}$,
- Analytical filter: Mode electrical. Odstraňte spojení z vlákna a po nastavení spojte na výstup bloku PinDiode.

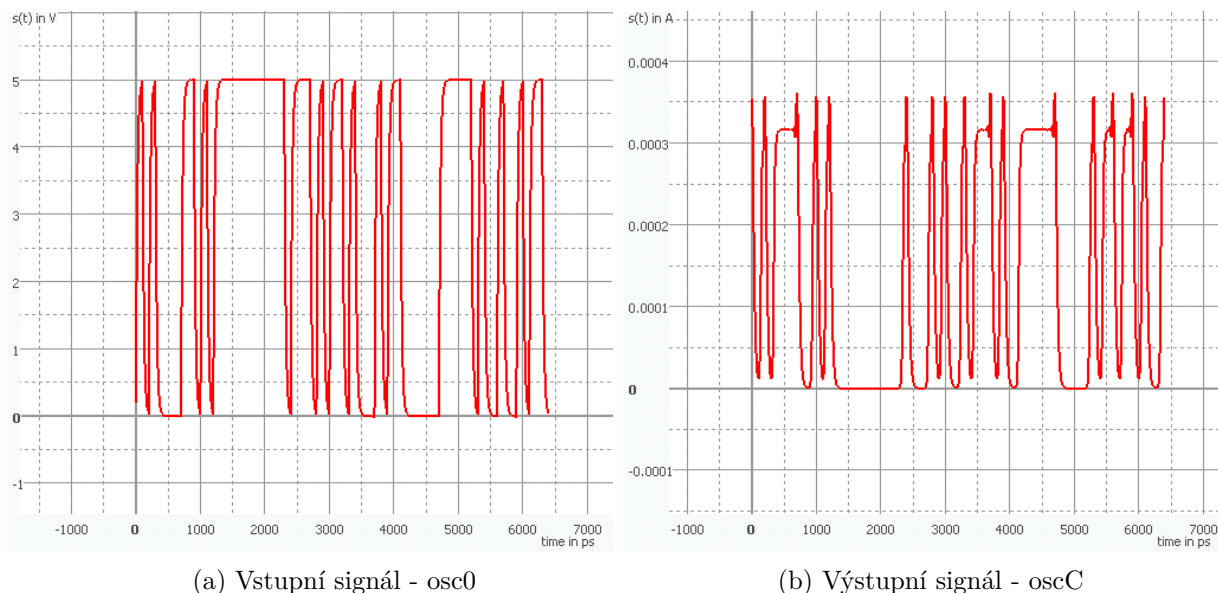
Spuštění simulace se provádí přes nástrojovou lištu v nabídce *Simulation* kliknutím myší na „Start simulation“ (viz obrázek 4.11) nebo použitím klávesy F5.



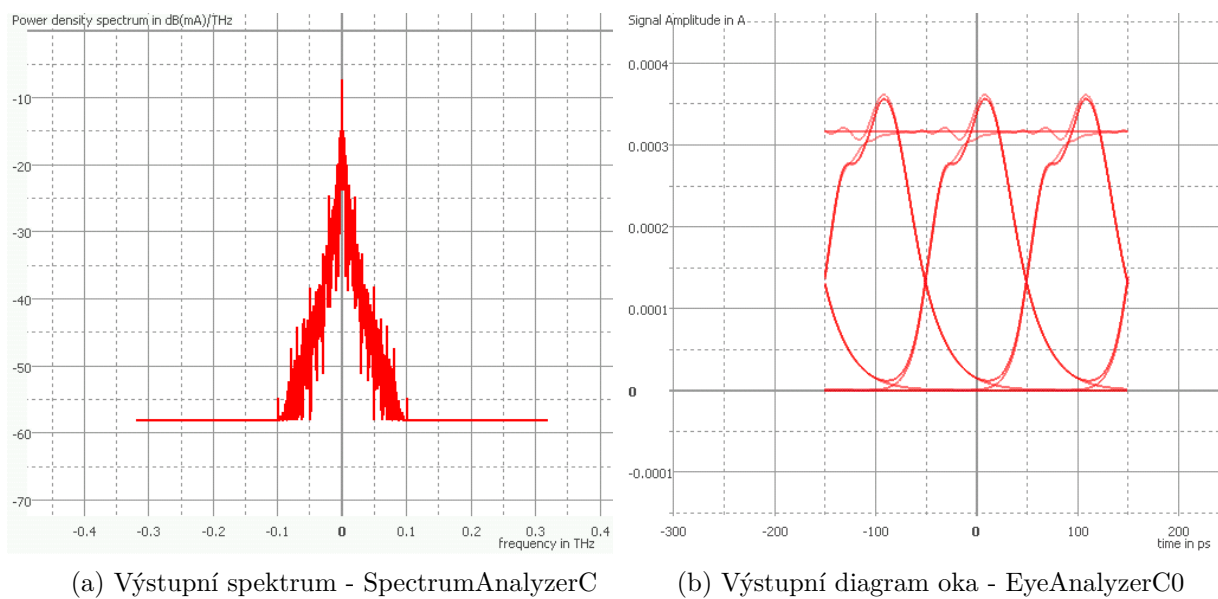
Obr. 4.11: Spuštění simulace v programu PHOTOSS

4.1.7 Výsledky PHOTOSS

Výsledkem jsou grafy zobrazující signál NRZ na přijímací a vysílací straně, kde na přijímací straně je signál v Ampérech, proto je signál invertovaný.



Obr. 4.12: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 4.13: Výstupní signál oko a spektrum. (Zdroj: Vlastní zpracování)

Optické výkony na vstupu do optického vlákna(OscA):

- max. Value: 0,501 mW

Optické výkony na výstupu z optického vlákna(OscB):

- max. Value: 0,422 mW

Z měřicího přístroje Eyeanalyzer byly odečteny tyto hodnoty: $Q_1 = 7,52416e^1$. Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{7,52416e^1}{\sqrt{2}})$, je menší než $1e^{-40}$.

4.1.8 Studentské rozšíření

OptSimTM: Vysvětlete jakou má funkci Besselův filtr.

Besselův filtr je lineárním filtrem s vlastností dolní propusti, která zachovává tvar vlny signálu v propustném pásmu. V simulaci je možné pozorovat, že při použití Besselova filtru na straně vysílače došlo ke snížení zákmitů u signálu NRZ. Při použití v přijímači se zvýšila kvalita přijímaného signálu (zvětšení otevření oka, zvýšení BER, snížení zákmitů NRZ).

PHOTOSS: Zajistěte vylepšení signálu. V dané úloze jsou na výstupu zákmity v signálu (OscilloscopeC -> Oscilloscope Amplitude). Jakým způsobem lze tento problém vyřešit?

Vylepšení signálu lze zabezpečit zvýšením řádu analyticalfilter0. Zvýšením řádu filtru se sníží šum vzniklý na přijímači (diodě) čímž dojde ke zkvalitnění výstupu.

4.1.9 Závěr úlohy

Úloha byla vytvořena, aby student poznal prostředí simulačního programu OptSimTM a PHOTOSS. Typické proklikání jednotlivých komponent by mělo zajistit, aby student dostal do povědomí možnosti nastavení, které budou vyžadovány v další úloze.

4.1.10 Otázky k úloze

1. Co znamenají zkratky OLT, ONU, ONT?
2. Které prvky ze schématu vytváří OLT a které ONU?
3. Jaký je celkový útlum trasy?
4. Definujte rozdíl mezi měrným útlumem vlákna a útlumem trasy.

4.2 Simulace transportní sítě

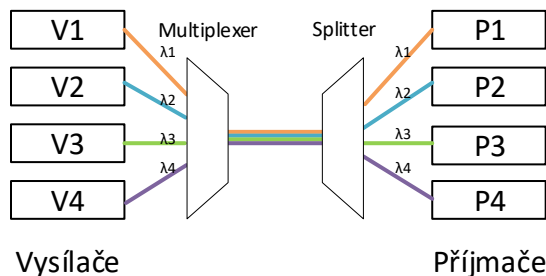
4.2.1 Cíle úlohy

1. Implementujte DWDM v programech OptSimTM a PHOTOSS.
2. Získat teoretické znalosti o prvcích tvořících multiplexovanou optickou síť.
3. Analyzovat získané výsledky.

4.2.2 Teoretický úvod

WDM

Wavelength-division multiplexing je vlnový multiplex, který představuje technologii spojování signálů pomocí vlnových délek. Ty mohou souběžně probíhat optickým vláknem, aniž by se ovlivňovaly. Jedná se tedy o frekvenční multiplex. Na začátku trasy se nachází multiplexor, který má za úkol navázat tyto vlnové délky do společného média - vlákna. Na konci se nachází demultiplexor - splitter, který vlnové délky rozdělí ke klientům. WDM pracuje jak na jednovidovém tak na vícevidovém vlákně. Počet vlnových délek je škálovatelný.



Obr. 4.14: Vlnový multiplex (Převzato a upraveno z [17])

WWDM

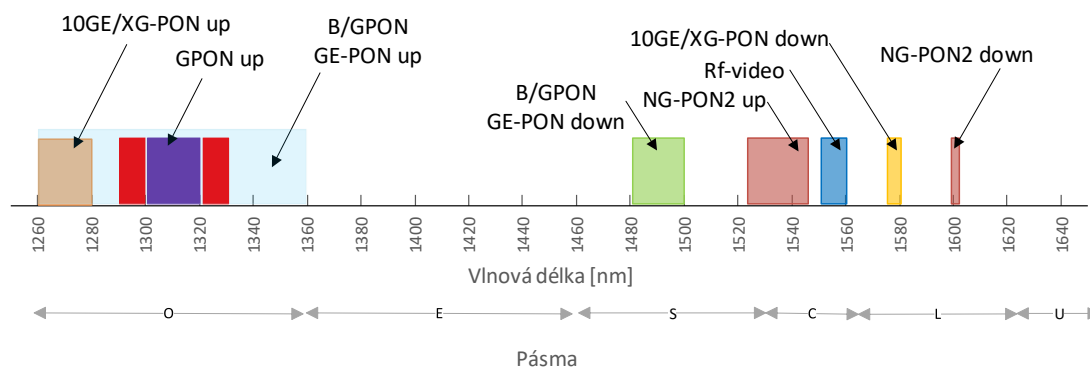
„WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), tzv. „široký“ vlnový multiplex většinou používá čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová optická vlákna). Jednotlivé vlnové délky WWDM multiplexu mají typický odstup 25 nm.“ [18, str. 133]

CWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hrubý“ vlnový multiplex vznikla jako levnější varianta DWDM. Technologie CWDM je forma vlnového multiplexu, která využívá větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály, než je tomu u klasické technologie DWDM. V doporučení ITU–T G.694.2 [19, str. 3] je stanoveno osmnáct vlnových délek s kanálovými rozestupy 20 nm a s tolerancí ± 6 –7 nm. Oproti DWDM jsou náklady na technologii menší například při pořízení vysílačů. Ovšem z toho vyplývá i nižší počet použitelných kanálů.

DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tzv. „hustý“ vlnový multiplex používá minimální odstupy mezi jednotlivými kanály, takže umí do jednoho vlákna implementovat desítky vlnových délek. V těchto případech se využívá jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Při tom je nezbytné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémně úzkou spektrální charakteristiku vyzařovaných vlnových délek. V doporučení ITU–T G.694.1 [20, str. 2] pro technickou aplikaci tohoto systému je definováno několik variant rozestupů mezi kanály, a to 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Referenční kmitočet od kterého se vytváří další kanály je dle výše zmíněného doporučení 193,1 THz. DWDM systémy mohou být provozovány v oblasti vlnových délek S,C a L optického pásma.



Obr. 4.15: Pásma s vyznačením PON technologií (Zdroj: Vlastní zpracování)

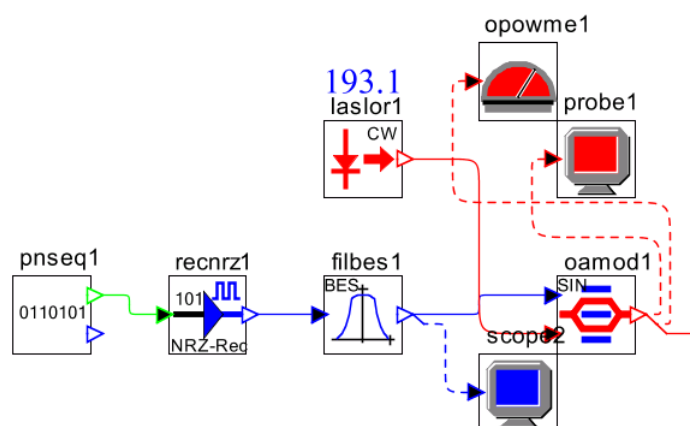
ITU pro WDM definuje rozsahy frekvencí, tyto frekvenční pásma jsou:

- pásmo O (Original): vlnové délky 1260-1360 nm,
- pásmo E (Extended): vlnové délky 1360-1460 nm,
- pásmo S (Short): vlnové délky 1460-1530 nm,
- pásmo C (Conventional): vlnové délky 1530-1565 nm,

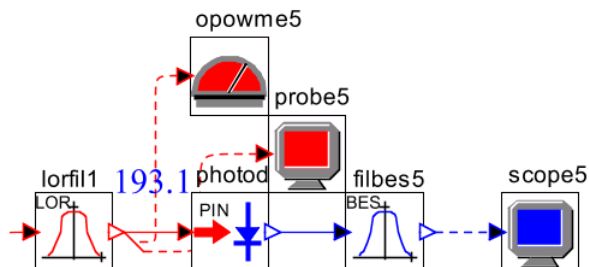
- pásmo L (Long): vlnové délky 1565-1625 nm,
- pásmo U (Ultra-Long): vlnové délky 1625-1675 nm.

Implementace vysílací a přijímací části

Implementace vysílací jednotky a přijímací jednotky demonstrováno na programu OptSimTM.



Obr. 4.16: Jednotka vysílače

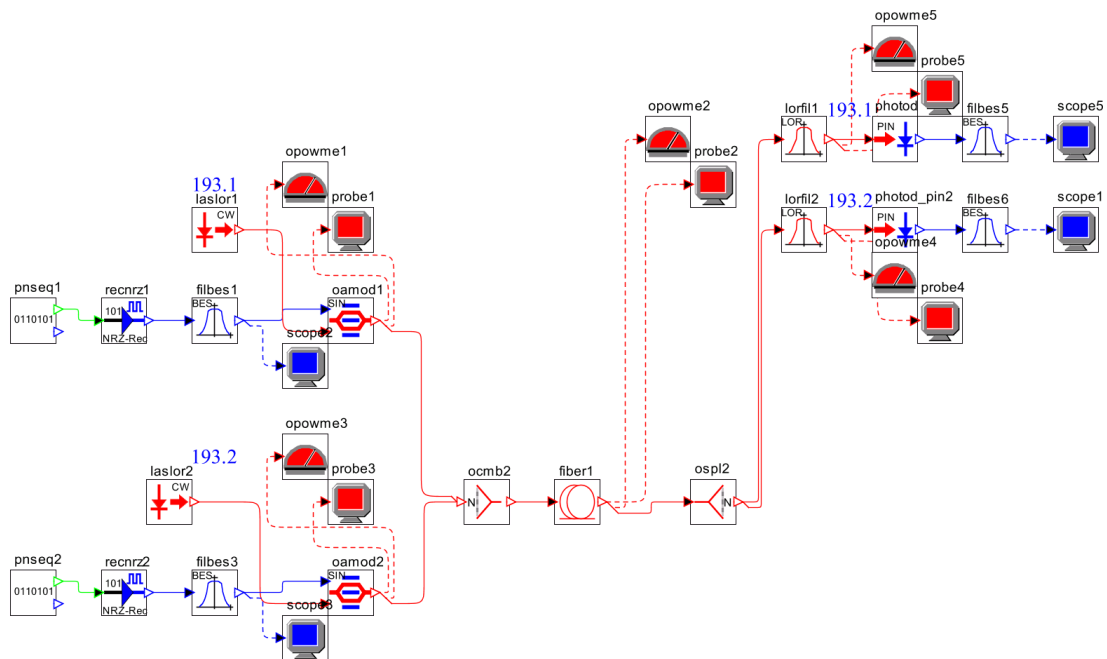


Obr. 4.17: Jednotka přijímače

Volba kanálu je realizována pomocí vysílané frekvence z laseru v jednotce vysílače 4.16 a na přijímači 4.17 pomocí lorentzovského filtru, který omezuje frekvenční rozsah přijímaného kanálu.

4.2.3 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte DWDM topologii v programu OptSim™ dle níže uvedeného postupu. Porovnejte signály, spektra a diagramy oka na začátku a na konci trasy.



Obr. 4.18: Topologie v úloze 2

Otevřte U2wdm.moml a uložte jej jako nový projekt. V této úloze je třeba rozšířit do DWDM se 100 GHz rozestupem mezi kanály (využití pásma C). V nastavení parametrů nastavíme Lower limit 192,6 a Upper limit 193,55 THz. Center frequency 193,1 THz. Rychlost 10 Gbit/s jako u předchozí úlohy. Parametry zapojení nastavte dle následujících parametrů:

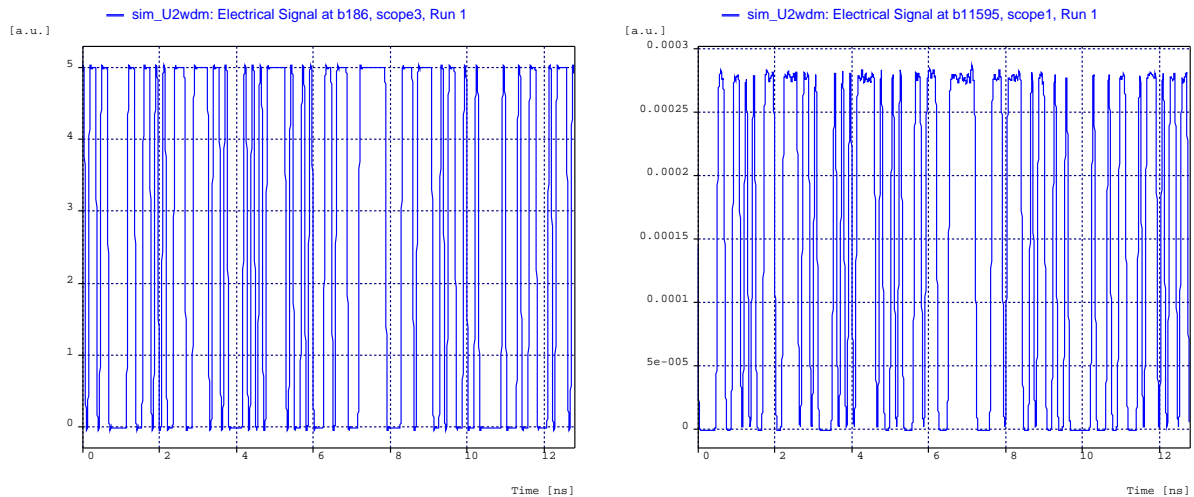
- CWLaser: $P = 0,001$ W, $f_0 = 193,1$ THz.
- Pulse Gen : Unit Volt, $A_Max = 5$ V, $A_Min = 0$ V, Bit_Rate = 10 Gbit,
- MZModulator : $U_0 = 0$ V , $U_PI = 5$ V, Modulation Source Electrical port.
- SMF = 10 km.
- Analytical filter : Mode electrical.
- Lorentzian optical filter : Notch Filter = Bandpass, Number of stages = 4, center frequency = 193,1 THz, -3 dB twosided Bandwidth 30 GHz.

Na přímou selekci kanálu byl použit lorentzovský optický filtr, ten funguje jako pásmová propust s nastavenou středovou frekvencí přijímaného kanálu a pásmem propusti poklesu o 3 dB je 30 GHz.

4.2.4 Výsledky OptSim™

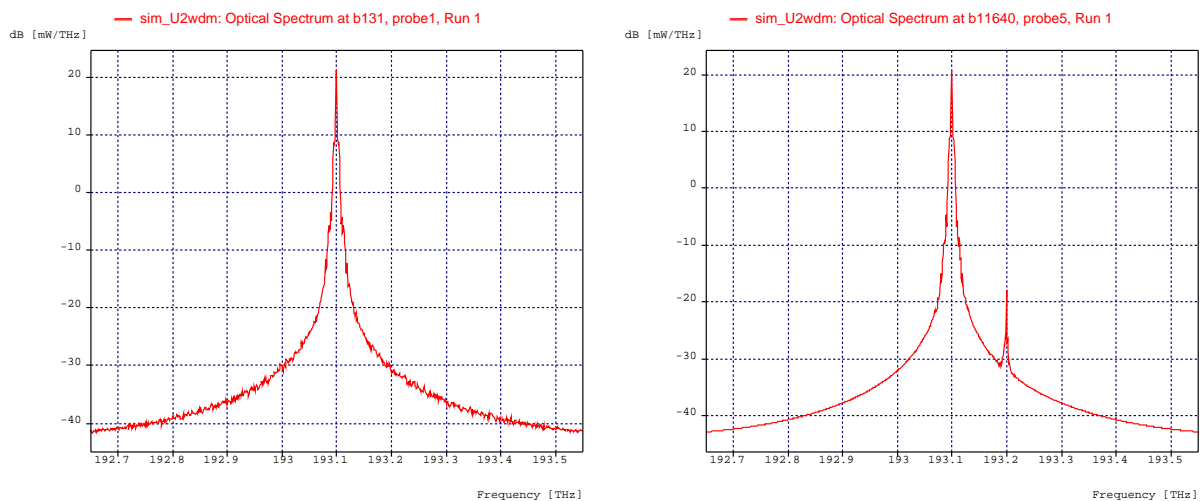
Na obrázcích níže jsou zobrazeny signály na vstupu a výstupu. U NRZ jsou vidět lehké zákmity, které mají vliv na kvalitu signálu. V diagramu oka se projeví jen minimálně. U diagramu zobrazující spektrum na měřícím přístroji probe5 je vidět utlumený kanál na 193.2 THz. Odečtené hodnoty z přístrojů:

- Scope1: $BER = 1e^{-40}$, $Q = 79,1244$ [lin], $Q = 37,966204$ [dB]
- Scope5: $BER = 1e^{-40}$, $Q = 87,3267$ [lin], $Q = 38,822939$ [dB]



(a) Vstupní signál na frekvenci 193,2 THz - scope3 (b) Výstupní signál na frekvenci 193,2 THz - scope1

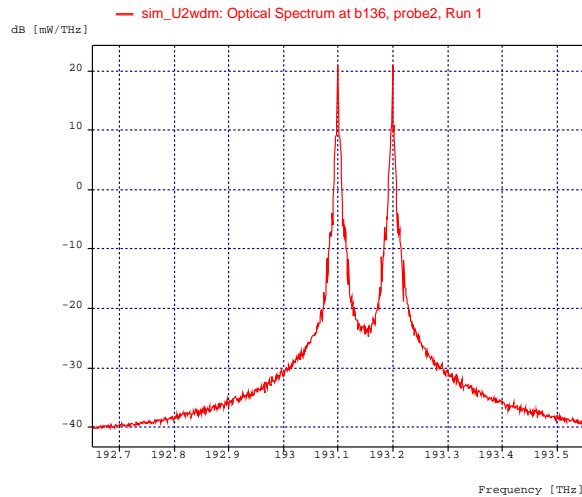
Obr. 4.19: Signálové porovnání na začátku a konci trasy pro frekvenci 193,2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)



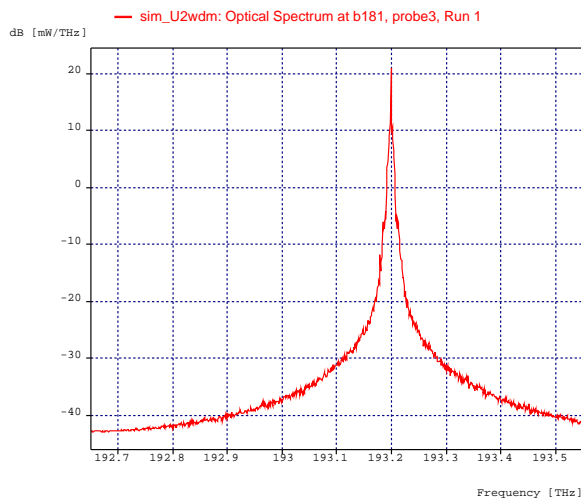
(a) Vstupní spektrum probe1

(b) Výstupní spektrum probe5

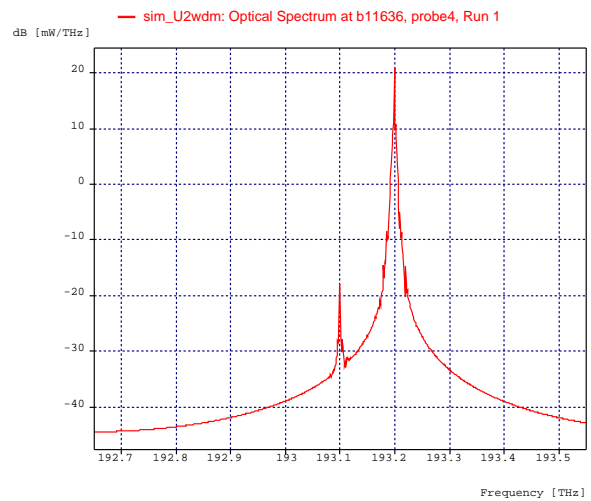
Obr. 4.20: Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.1 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)
Společné výstupní spektrum dvou vlnových délek zobrazeno na 4.21.



Obr. 4.21: Společné výstupní spektrum probe2

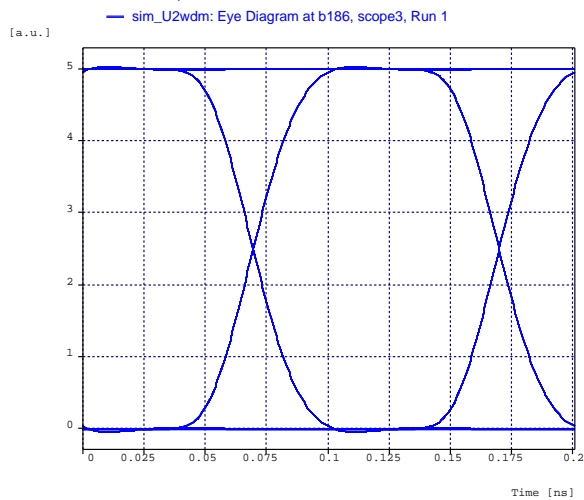


(a) Vstupní signál 193,2 THz - probe3

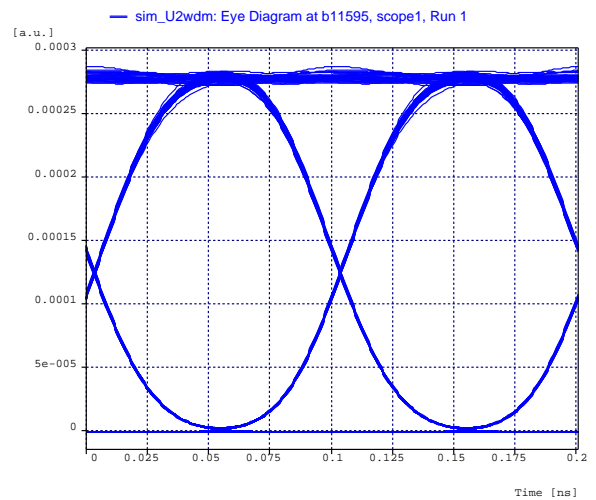


(b) Výstupní signál 193,2 THz - probe4

Obr. 4.22: Vstupní a výstupní optické spektrum kanálu 193.2 THz (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Vstupní diagram oka - scope3

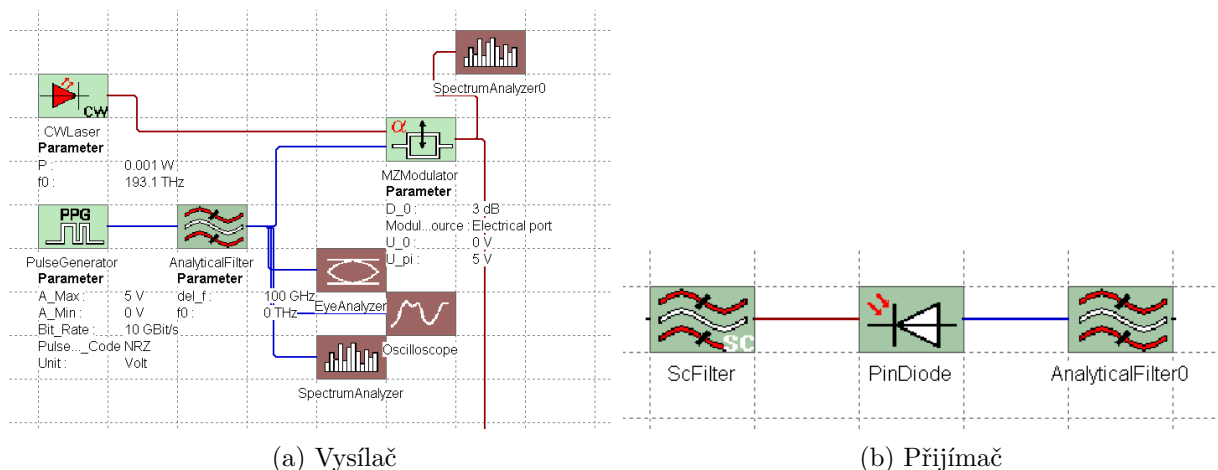


(b) Výstupní diagram oka - scope1

Obr. 4.23: Vstupní a výstupní oko (Zdroj: Vlastní zpracování)

4.2.5 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

Vytvořte DWDM topologii v programu PHOTOSS dle níže uvedeného postupu. Porovnejte signály, spektra a diagramy oka na začátku a na konci trasy. Implementace vysílače a přijímače pro jeden kanál v programu photoss je zobrazeno na obrázku 4.24. Hlavními komponenty vysílače jsou CWlaser, pulsegenerator, analyticalfilter a MZModulator. U přijímače je to SC filter (filtr na separaci kanálů), Pindiode a analyticalfilter. Filtry na přijímači i vysílači jsou filtry s besselovou funkcí.

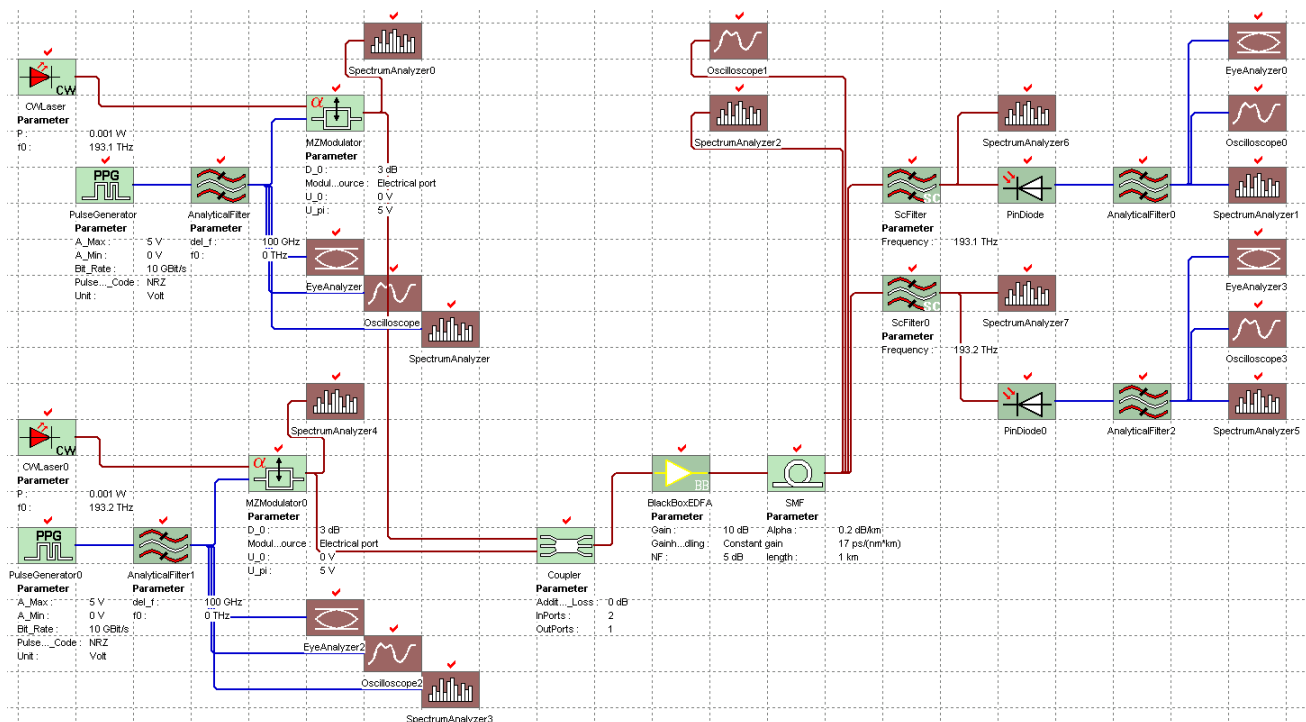


Obr. 4.24: Implementace vysílače a přijímače kanálu v PHOTOSS

Otevřete program PHOTOSS a přes file->open zvolte „U2 wdm vychozi.pho“. Uložte jako přes save as do souboru s jiným názvem než „U2 wdm vychozi.pho“ (nepřepisujte jej).

V nastavení simulace je nutno nastavit metodu simulace na Separated Channels. Díky tomuto nastavení lze použít jednoduchý filtr na selekci kanálu (SC filter). Nastavíme Center frequency 193,1 THz. Ref bitrate 10 Gbit/s. Ref bandwidth 100 GHz. S každým dalším kanálem je třeba upravit coupler a přidat mu vstupní port (In-port).

Dále upravte topologii podle schématu 4.25:



Obr. 4.25: PHOTOSS topologie v úloze 2

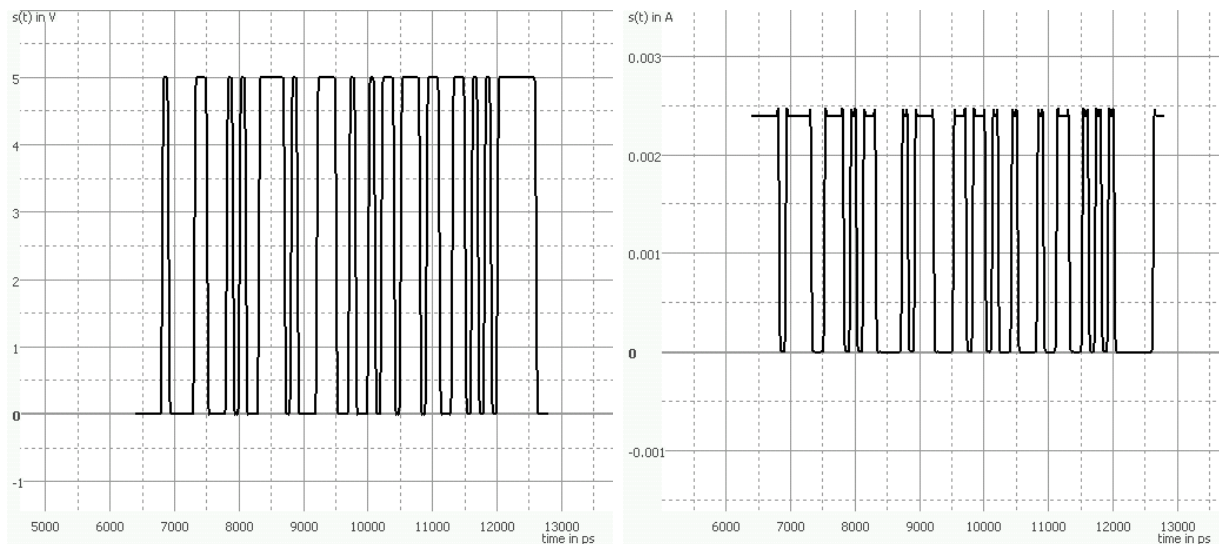
Parametry použité v úloze:

- CWLaser: $P = 0,001 \text{ W}$, $f_0 = 193,1 \text{ THz}$.
- Pulse Gen: Unit = Volt, Pulse_code = NRZ, $A_{\text{Max}} = 5\text{V}$, $A_{\text{Min}} = 0\text{V}$, Bit_Rate = 10Gbit,
- MZModulator: $U_0 = 0\text{V}$, $U_{\text{PI}} = 5\text{V}$, Modulation Source Electrical port.
- Analytical filter,0: Mode electrical, type Bessel, $\text{del_f} = 100\text{GHz}$.
- SMF: lenght = 1 km, alpha = 0,2dB/km.
- coupler: Additional_loss = 0dB, InPorts dle potřeby, outport = 1.
- BlackBoxEDFA: Gain 10dB, NF = 5dB. ScFilter: 193.1THz.

4.2.6 Výsledky PHOTOSS

Odečtené hodnoty z přístrojů:

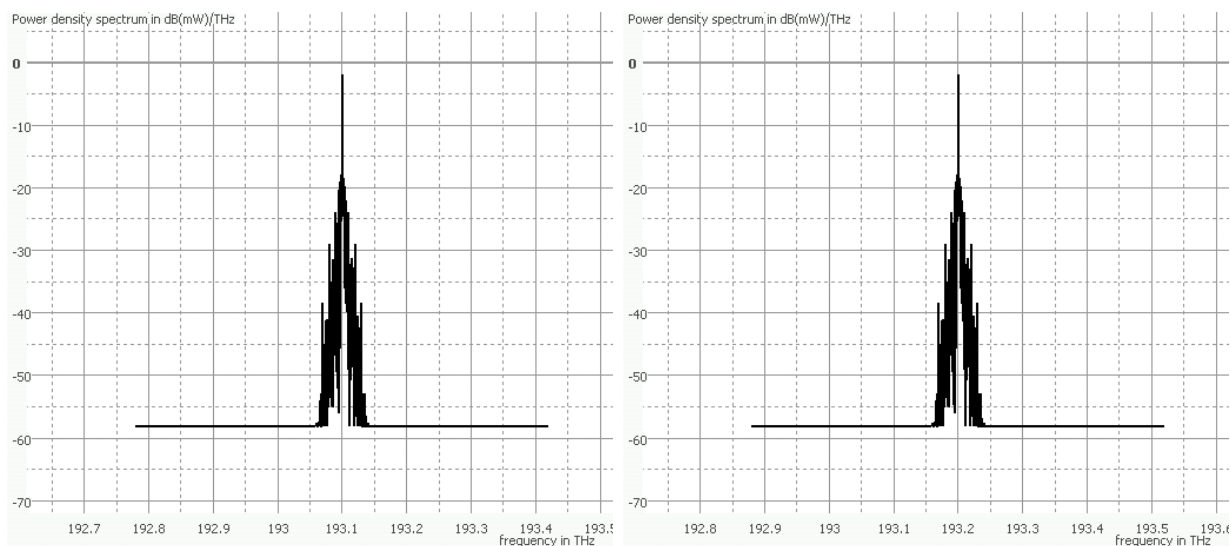
- EyeAnalyzer0: $Q_1 = 7,54768e^1$, $BER0 = \frac{1}{2}erfc(\frac{7,54768e^1}{\sqrt{2}})$, je menší než $1e^{-40}$.
- EyeAnalyzer3: $Q_1 = 7,574975e^1$, $BER3 = \frac{1}{2}erfc(\frac{7,574975e^1}{\sqrt{2}})$, je menší než $1e^{-40}$.



(a) Vstupní signál na 193,1 THz - Oscilloscope

(b) Výstupní signál na 193,1 THz - Oscilloscope0

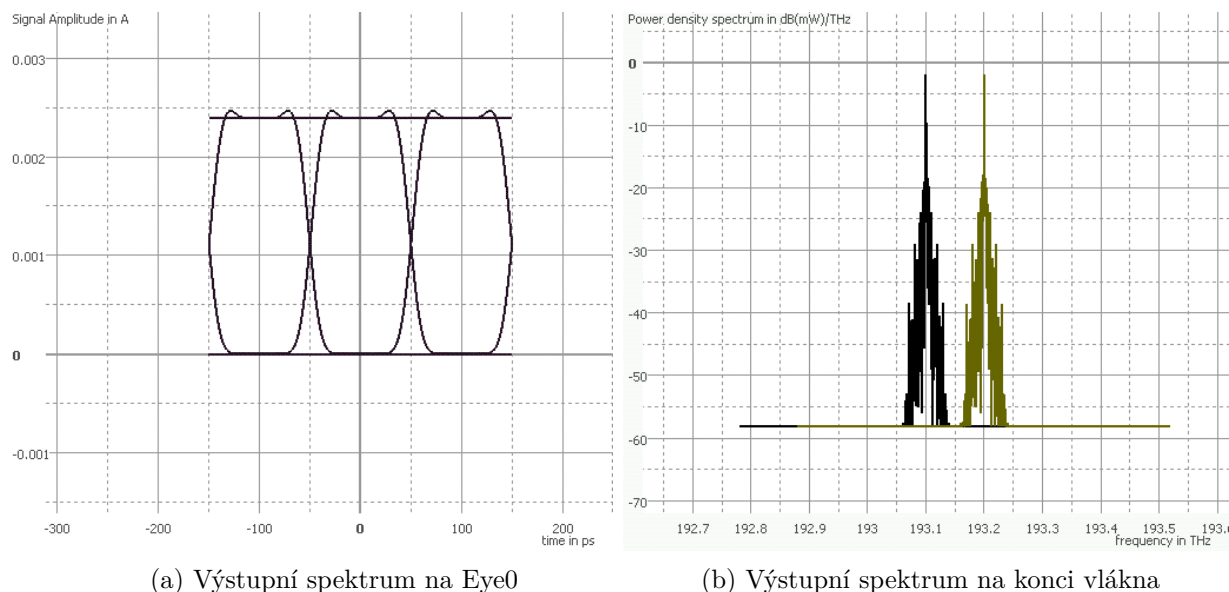
Obr. 4.26: Signálové porovnání na začátku a konci trasy (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Výstupní spektrum SpectrumAnalyzer6

(b) Výstupní spektrum SpectrumAnalyzer7

Obr. 4.27: Výstupní spektrum přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 4.28: Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

Rozšíření PHOTOSS

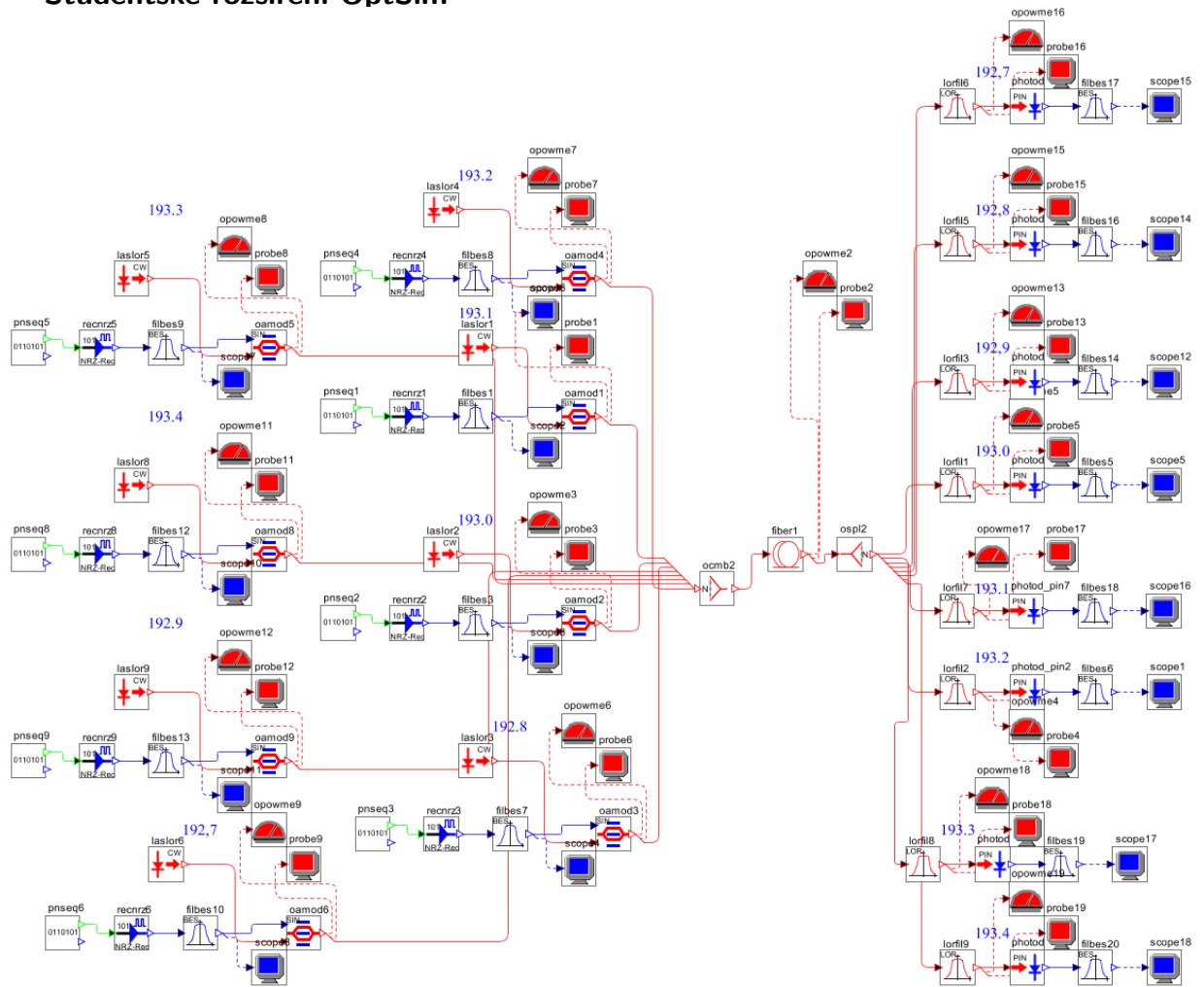
Po odsimulování zjistěte, jak se změní výkonová charakteristika při změně délky vlákna na 10 km.

Po změně délky na 10 km dochází ke snížení úrovně výkonu na přijímači zobrazeném na SpectrumAnalyzeru o cca 1-3 dB(mW). Dále lze pozorovat snížení kvality NRZ signálu. U kanálu 193,1 THz je možné odečíst Q faktor z přístroje EyeAnalyzer0 $Q_{1KM} = 70,548$ a pro 10km $Q_{10KM} = 8,363$.

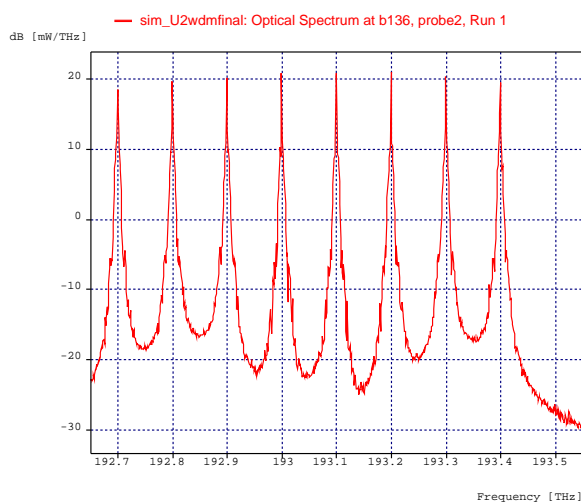
4.2.7 Studentské rozšíření OptSim™ a PHOTOSS

Ve specifikovaném rozsahu 192,6 – 193,55 THz rozšiřte do 8 kanálů DWDM s roze-
stupem 100 GHz.

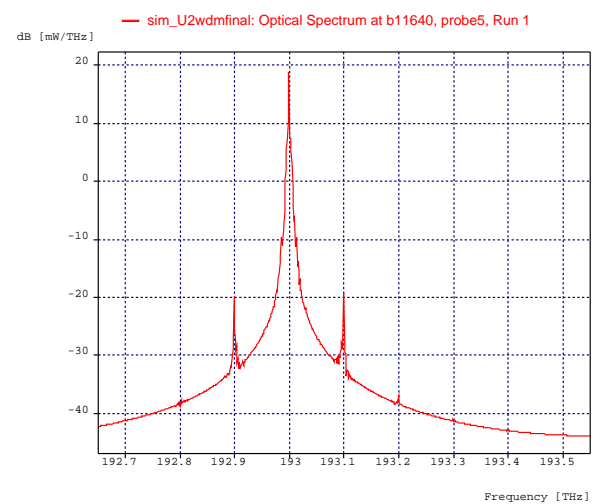
Studentské rozšíření OptSim™



Obr. 4.29: Topologie v úloze 2 – studentské rozšíření OptSimTM



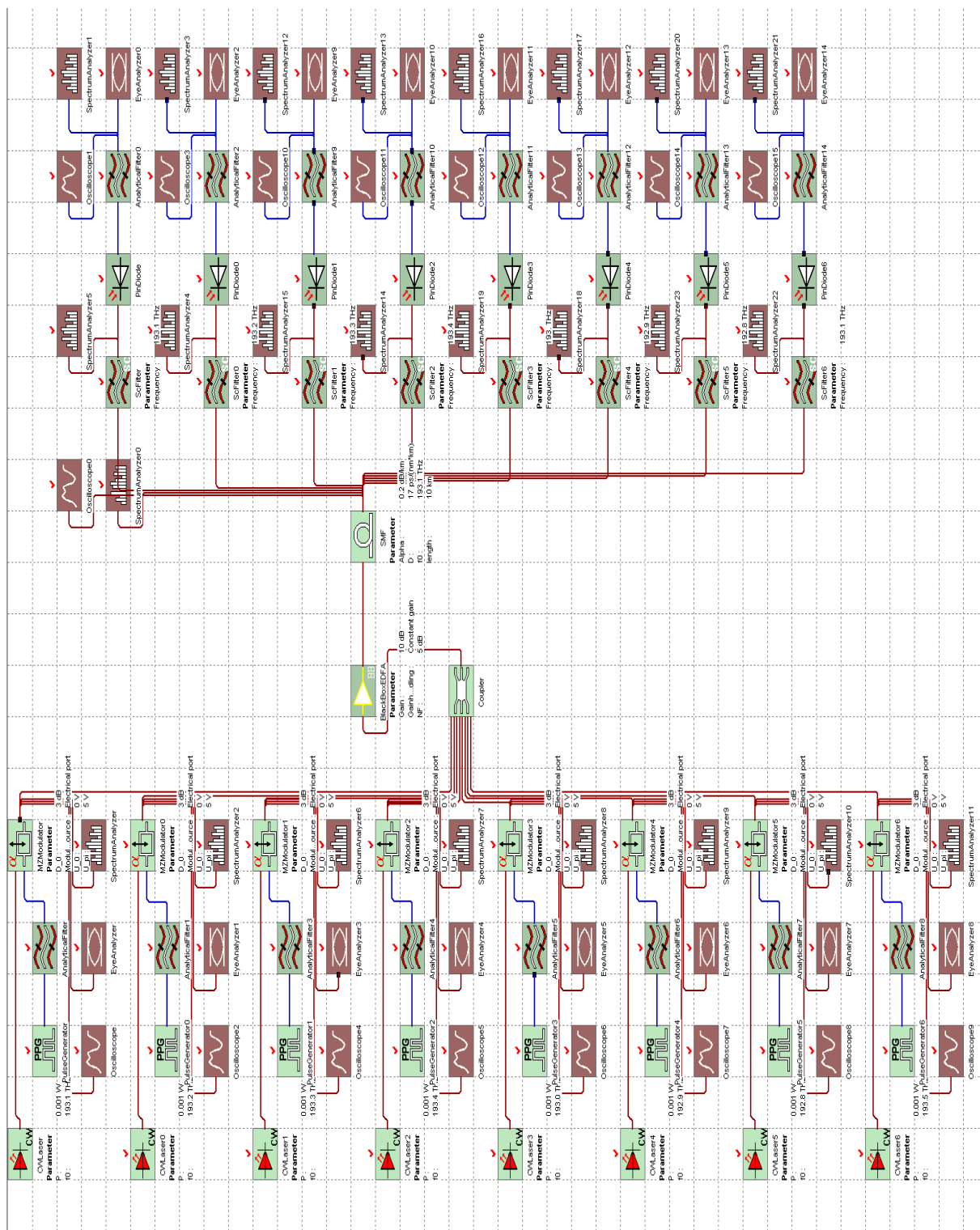
(a) Výstupní spektrum – probe2



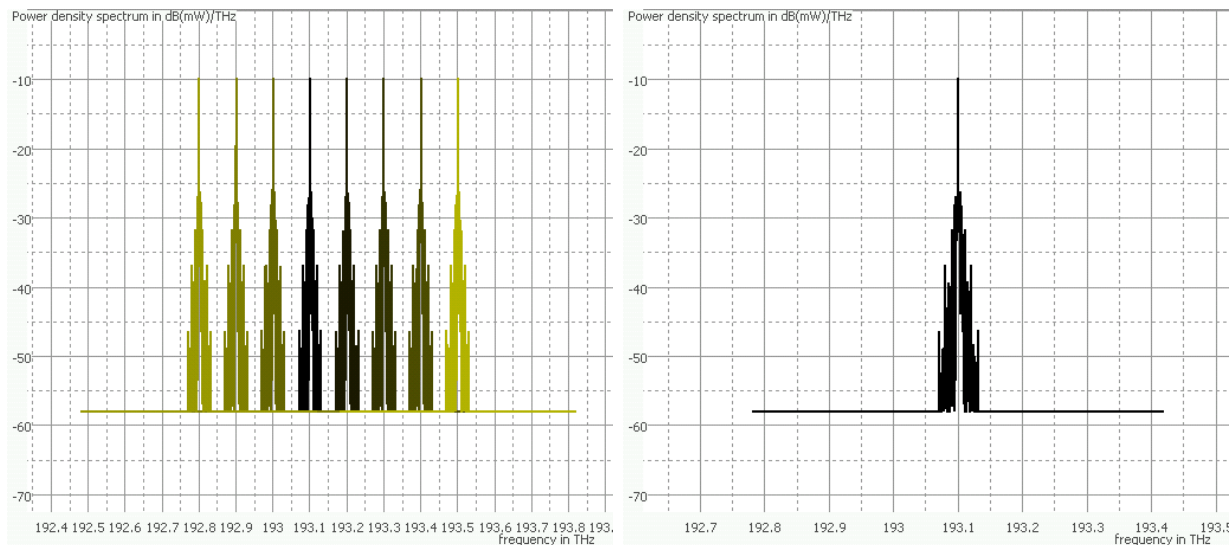
(b) Výstupní spektrum kanálu – probe5

Obr. 4.30: Výstupní optické spektrum WDM OptSim™ (Zdroj: Vlastní zpracování)

Studentské rozšíření PHOTOSS



Obr. 4.31: Topologie v úloze 2 - studentské rozšíření PHOTOSS



(a) Výstupní spektrum celkové – SpectrumAnaly- (b) Výstupní spektrum kanálu – SpectrumAnalyzer5
zer0

Obr. 4.32: Výstupní optické spektrum (Zdroj: Vlastní zpracování)

4.2.8 Závěr úlohy

Student si v dané úloze vyzkouší vytvoření transportní sítě WDM, která využívá technologie vícenásobného užití společného vlákna za použití více vlnových délek.

4.2.9 Otázky k úloze

1. Porovnejte DWDM a CWDM. Jaké jsou hlavní rozdíly mezi těmito technologiemi?
2. Proč je důležité potlačení vedlejších vlnových délek v přijímači? Vysvětlete.
3. Jaká je aktuální rychlost, po rozšíření na 8 kanálů, kterou může jeden zákazník přijímat? Uvažujte, že by měl alokovaných všech 8 kanálů.
4. Jakým jiným způsobem než je škálováním WDM lze ještě navýšit rychlost?

4.3 Simulace koherentního přenosu (PM-QPSK)

4.3.1 Cíle úlohy

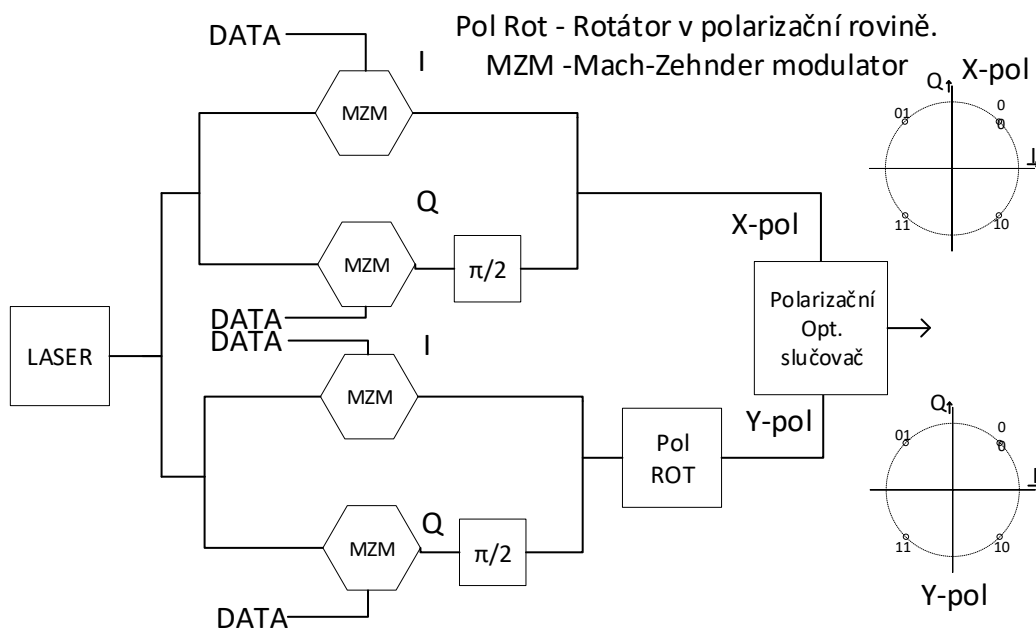
1. Implementujte PM-QPSK v programech OptSimTM a PHOTOSS.
2. Získat teoretické znalosti o přenosu v polarizačních rovinách.
3. Analyzovat získané výsledky.

4.3.2 Teoretický úvod

PM-QPSK

Z anglického názvu Polarization multiplexed - Quadrature Phase-Shift Keying. Někdy označována jako DP-QPSK (dual polarization). Jak název vyjadřuje, jde o modulaci QPSK obohacenou o další polarizační rozměr ve vlákne. PM-QPSK je rozšířený koherentní způsob modulace, která pro svoji funkci na přijímači vyžaduje znalost fáze vysílaného signálu.

Modulátor PM-QPSK je složen ze dvou QPSK modulátorů. Výstupy z těchto modulátorů prochází polarizačním slučovačem dvou signálů (ve schématu 4.33 rozděleno na opt. slučovač a ve větvi Y-polarizace jako rotátor polarizace).



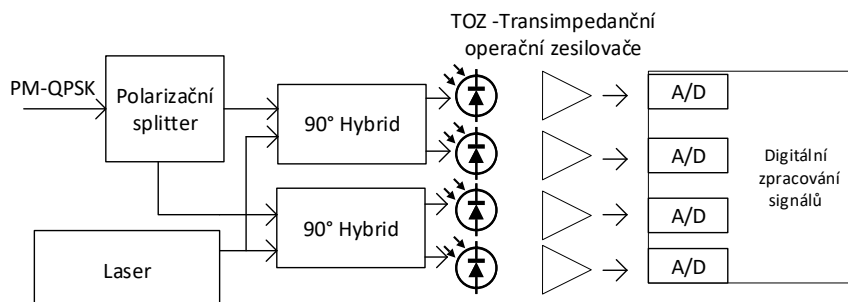
Obr. 4.33: PM-QPSK modulátor/vysílač (Zdroj: Převzato a upraveno z [14])

Obrázek 4.34 znázorňuje funkční blokové schéma moderního optického koherentního

přijímače. Příchozí optický signál prochází polarizačním rozdělovačem (polarizační splitter), který rozdělí signál na dva ortogonální polarizační signály. Tento rozdělovač vytvoří dva signály, z nichž je jeden polarizovaný v ose X a druhý v ose Y. Každý z nich je předán do 90-ti stupňového optického hybridního obvodu. Tento obvod umožňuje, aby složky I a Q fáze signálu byly extrahovány v důsledku známého signálu generovaného místním oscilátorem. Tento proces extrakce umožňuje lokální oscilátorový laser, který je podstatou koherentní detekce. Fázové signály se nyní převedou z optické domény na elektronickou doménu pomocí série vyvážených fotodetektorů. Každý z těchto signálů se skládá ze tří prvků:

- úroveň šumu,
- element digitálního převodníku představující výkon lokálního oscilátoru,
- koherentní signál.

Pokud by byl použit jediný fotodetektor, bylo by nutné použít lokální oscilátorový laser o 20 až 25 decibelů (dB) větší výkon než příchozí signál, aby výsledný signál mohl dominovat oproti generovanému šumu. Pomocí vyváženého fotodetektoru je možné použít mnohem méně výkonný lokální oscilátor. Za účelem obnovení přenášených bitů se provádí synchronizace nosné fáze v bloku zpracování signálu [14].



Obr. 4.34: PM-QPSK přijímač (Zdroj: Převezato a upraveno z [14])

Kromě obrovského zvýšení citlivosti detektoru může být koherentní detektor laděn tak, aby přijímal pouze určitou vlnovou délku, což umožňuje vysokou úroveň selekce signálu z kanálů WDM.

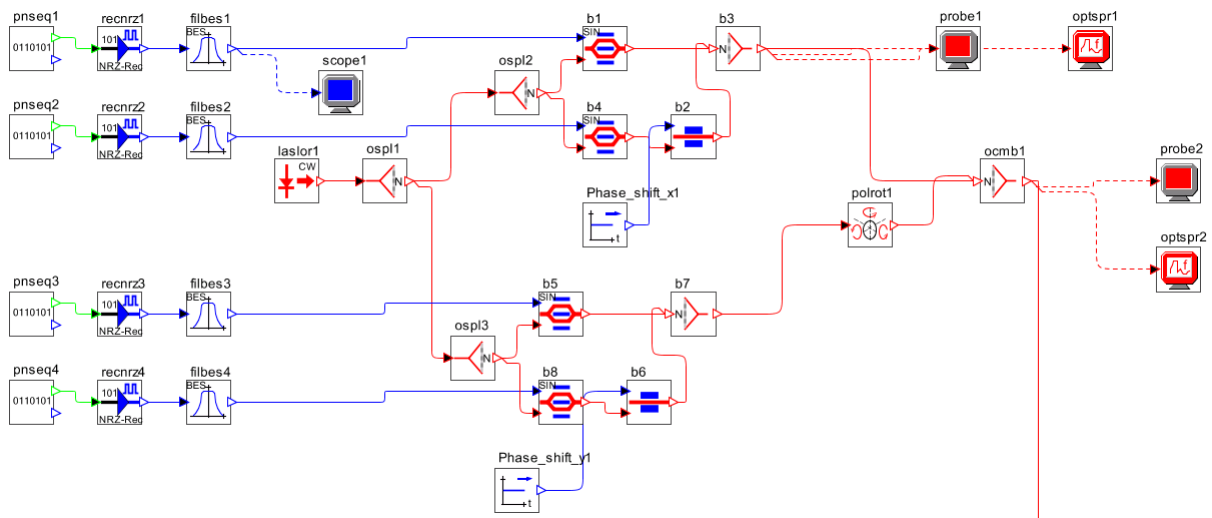
4.3.3 Zadání a realizace úlohy v programu OptSim™

Vytvořte v programu OptSim™ PM-QPSK vysílač a přijímač se vzdáleností 1 km.
File -> New -> Sample-mode project.

Zvolte a potvrďte umístění projektu. Parametry simulace (time domain) nastavte:

- lower limit 192,8992 THz, upper limit 193,1008 THz, center frequency 193 THz, vbs Bandwidth 0,2016 THz.
- reference bitrate = 28 Gbit/s, samples per bit = 9, total simulated time-span = 60ns, optical field representation = dual polarization.

Strana vysílače:



Obr. 4.35: PM-QPSK modulátor OptSim™

S parametry:

- pnseq1: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 1;

V advanced záložce:

- bit edge Deterministic,
- bit edge with respect to Sim start time = 0,
- starting time = 0,
- starting point 0.

- pnseq2: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 2;

V advanced záložce:

- bit edge Deterministic,
- bit edge with respect to Sim start time = 0,
- starting time = 512,
- starting point 0.

- pnseq3: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 3;
V advanced záložce:
 - bit edge Deterministic,
 - bit edge with respect to Sim start time = 0,
 - starting time = 1024,
 - starting point 0.
- pnseq4: bitrate = 28Gbit/s, PseudoRandomSequence Manual, degree = 11, Polynomial Type Deterministic, Polynomial number = 4;
V advanced záložce:
 - bit edge Deterministic,
 - bit edge with respect to Sim start time = 0,
 - starting time = 1536,
 - starting point 0.
- recnrz1-4: low level = -5, high level = 5, time slope 0, crossing point 50
- filbes1-4: lowpass filter, number of poles = 10, -3 dB bandwidth = 28 GHz, amplitude plot = no.
- laslor1: Center frekvency: 193.0 THz, source status = 1, cw power 3 mW, Noise Type = ideal.
- optical splitter ospl1: splitter s útlumem 3 dB na každý výstup.
- ospl2,3 a b3,b7: jsou couplery a splittery s nulovým útlumem.
- MZM b1,4,5,8: excess loss = 0 dB, offset voltage Von = 5 V, extinction ratio = 20 dB, chirp factor = 0, Vpi = 5V.
- optical phase modulator b2,b6: excess loss = 0dB, zero phase voltage = 0, Vpi = 5V, electrical filtering = no.
- bias signal generator „phase_shift_X,Y“: level 2.5 AU.
- polarization rotator „polrot1“: rotation about axis S1 = 0°, S2 = 0°, S3 = 180°, Number of rotation = one, first rotation = Axis_S3.
- ocmb1 = 3.0 dB na každý výstup.

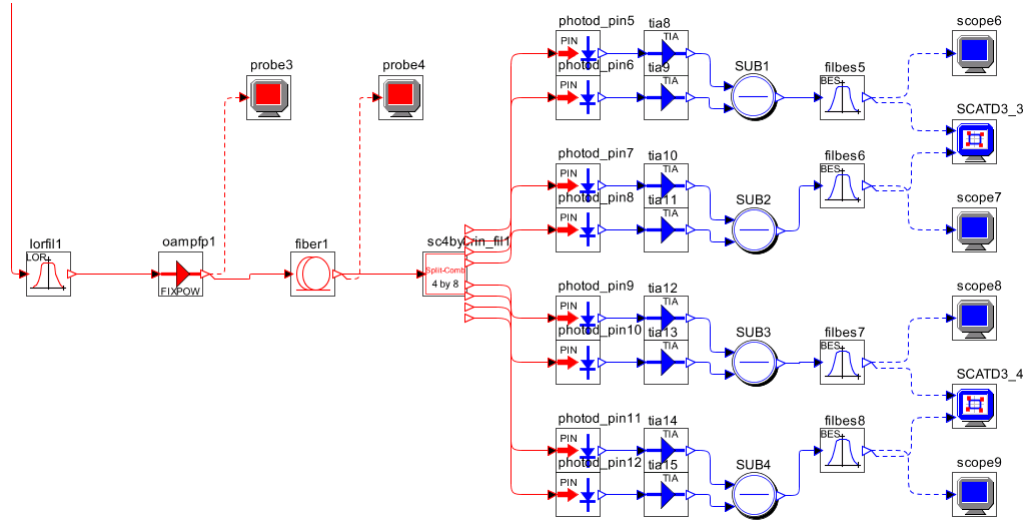
Popis vybraných parametrů vysílače:

- pnseq:
 - Degree - délka polynomu odpovídající pseudo-náhodné sekvenci je $2^{degree} - 1$ bitů.
 - Bit edge with respect to Sim start time je parametrem, který nastavuje hranu signálu při začátku simulace.
 - Starting point nastavuje, jaký první bit se vybere při startu simulace, mezi pseudonáhodnými sekvencními bity.
- filbes - Number of poles - je číslem vyjadřující počet pólů besseleva filtru.
- MZM - Extinction ratio [dB] - Poměr mezi maximální a minimální přenosovou

hodnotou výstupního optického výkonu. Default = 20. $ER_{db} = 10\log(ER_{LIN}^2)$ [dB] [31, str.128]

- MZM - chirp factor - při nastavení 0 je MZM definován jako bezzákmitový modulátor.

Strana přijímače s trasou:



Obr. 4.36: PM-QPSK demodulátor/přijímač OptSim™

S parametry:

- Optical lorentzian filter lorfil1: filter = bandpass, stages = 5, -3 dB bandwidth = 23,8 GHz.
- Fixed gain optical amplifier oampfp1: Output power = 5 mW.
- Fiber: lenght = 1 km.
- Splitter-combiner 4by8 (sc4by8rin_fil1): ex = 0, ey = 0, plo = 10, philo = 0, RIN = -155, NPOLES = 5, bw_rin = 30.
- Photod_pin: quantum efficiency = 0.7, Quantum noise = ON, dark current = 0.
- TIA electrical amplifier: transimpedance = 200 ohm, Gain = 46,0206, noise density 29,12965 pA/sqrt(Hz), standard deviation = $1,034e^{-5}$ AU.
- Electrical subtractor sub1-4.
- Bessel filter filbes5-8: Lowpass, poles = 5, -3 dB bandwidth 28 GHz.

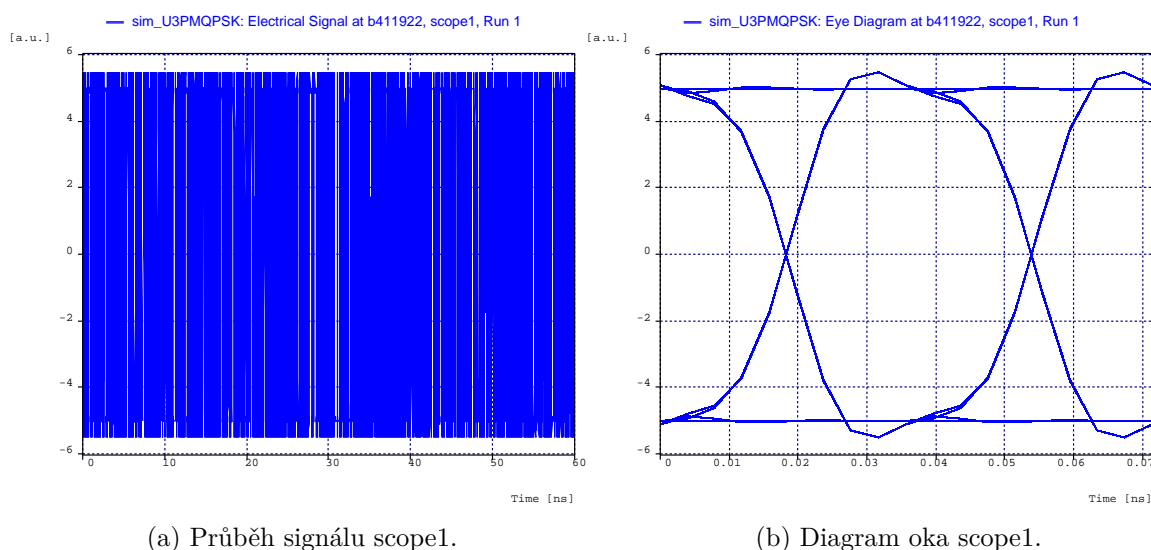
Popis vybraných parametrů přijímače:

- Splitter-combiner 4by8 (sc4by8rin_fil1):
 - RIN – relativní intenzita šumu lokálního oscilátoru [db/Hz].
 - NPOLES – počet pólů integrovaného beselova filtru
 - bw_rin -3 dB pásmo integrovaného beselova filtru [GHz].
- Photod_pin:
 - Quantum efficiency – určuje, kolik průměrných párů elektron-díra je generováno na každý dopadající foton.

- Quantum noise – tento parametr určuje zda dioda bude generovat šum.
- Dark current – průměrná hodnota proudu generovaného působením reverzního napětí přivedeného na fotodiodu.
- Electrical subtractor sub1–4 – využívá se jako rozdílová část přizpůsobeného (vybalancovaného) přijímače.

4.3.4 Výsledky OptSim™

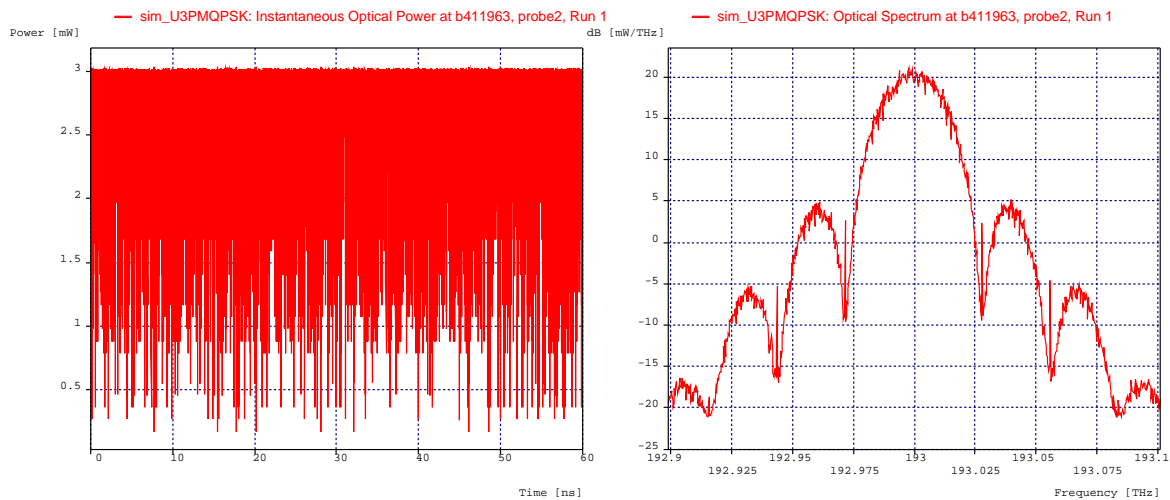
Na výstupu z vysílače (Probe2) 4.38 a po průchodu optickým filtrem (Probe3) 4.39 je vidět odfiltrování podružných frekvenčních složek signálu, které zvyšovali šum a snižovali kvalitu přijímaného signálu na přijímači koherentního signálu.



Obr. 4.37: Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)

Spektrum a diagram oka je podobný pro obě polarizace. V konstelačním diagramu 4.41 jsou vidět 4 úrovně signálu (qpsk). Z měřících přístrojů byly odečteny tyto hodnoty:

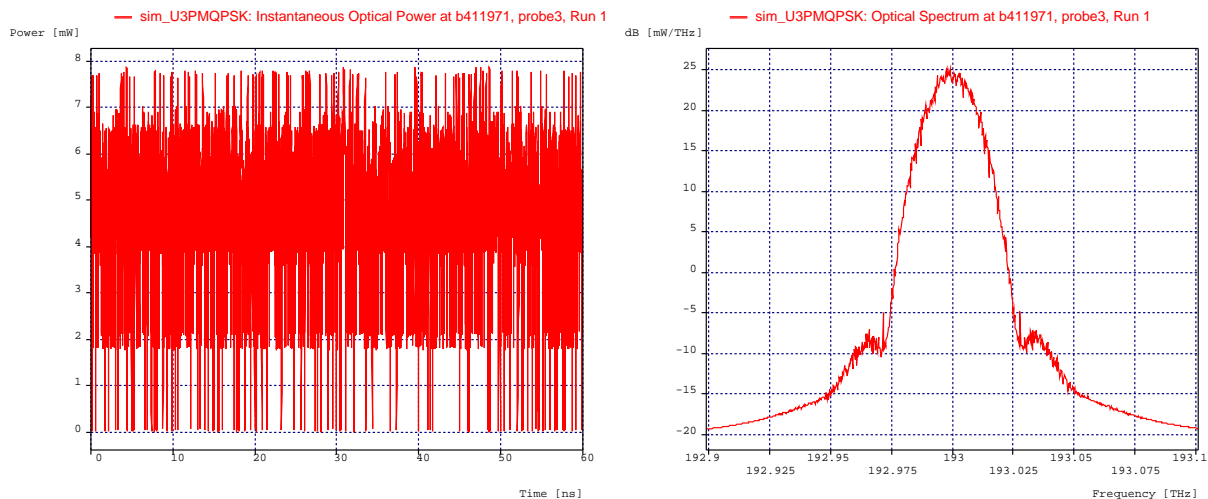
- Scope6: $BER = 4,79661e^{-5}$, $Q = 3,94531[lin]$, $Q = 11,921626[dB]$
- Scope7: $BER = 4,8966e^{-5}$, $Q = 3,91358[lin]$, $Q = 11,851494[dB]$
- Scope8: $BER = 4,30035e^{-5}$, $Q = 3,9501[lin]$, $Q = 11,932159[dB]$
- Scope9: $BER = 4,15288e^{-5}$, $Q = 3,39377[lin]$, $Q = 11,905008[dB]$



(a) Výkonová charakteristika Probe2 - výstup vysílače.

(b) Optické spektrum Probe2

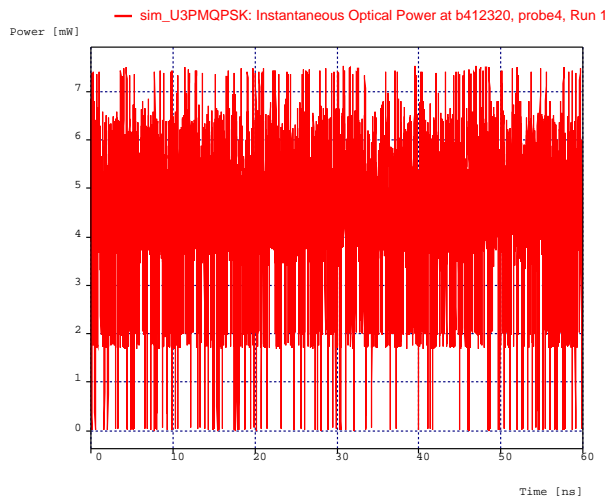
Obr. 4.38: Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka na výstupu z přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)



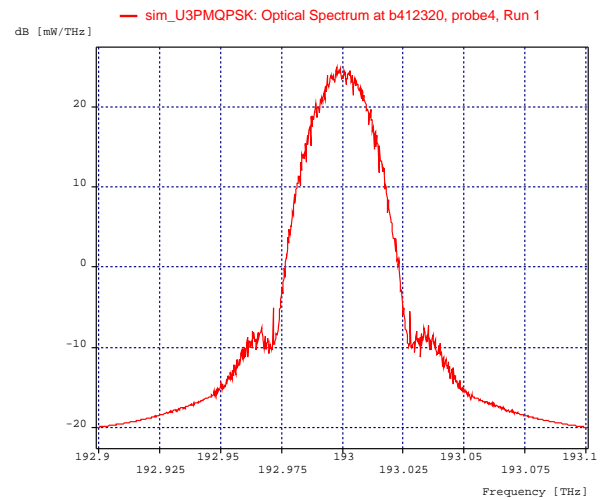
(a) Výkonová charakteristika probe3

(b) Optické spektrum probe3

Obr. 4.39: Spektrum a výkon na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

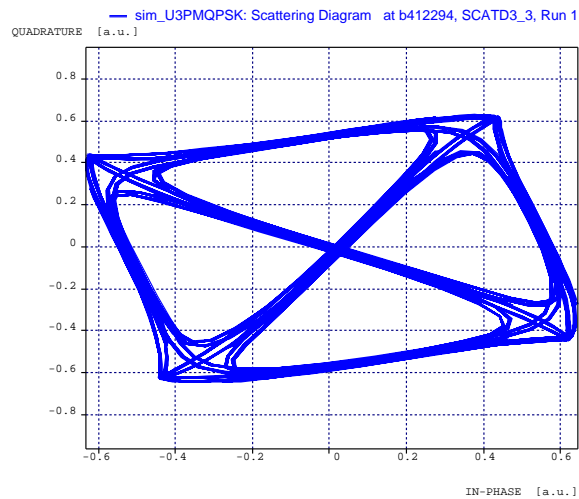


(a) Výkonová charakteristika probe4

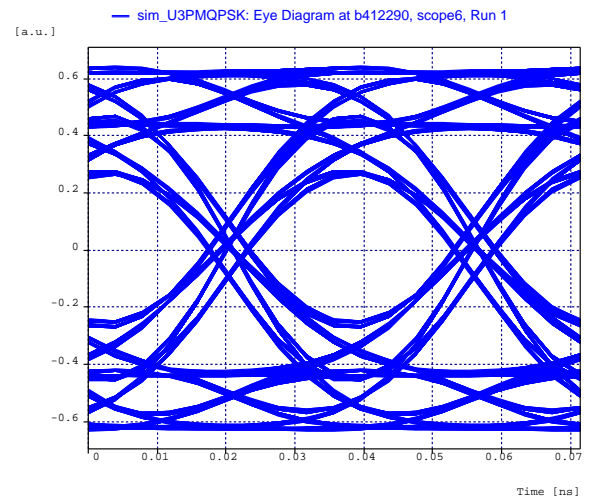


(b) Optické spektrum probe4

Obr. 4.40: Konstelační diagramy na výstupu z vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Konstelační diagram na straně přijímače



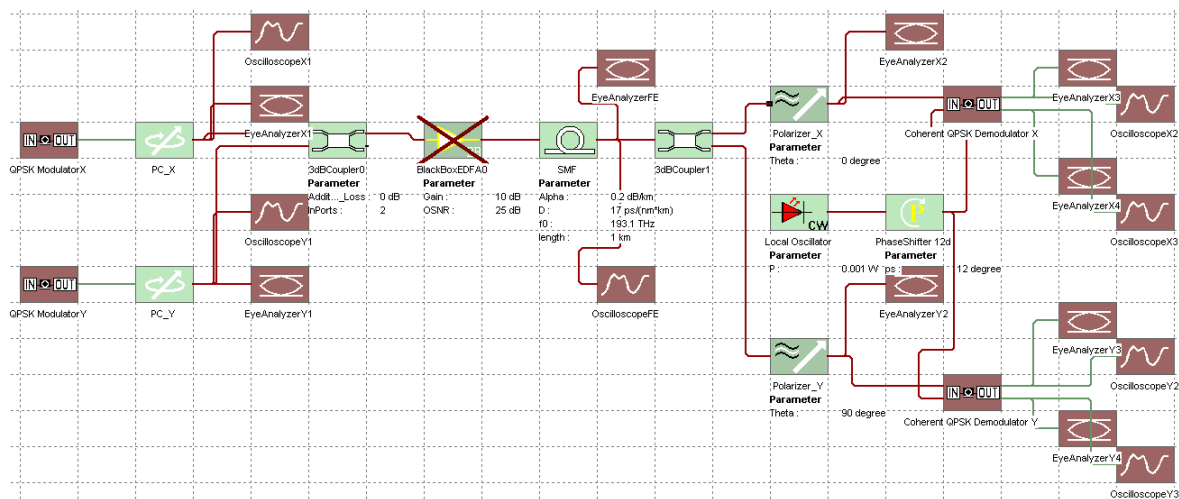
(b) Diagram oka scope6

Obr. 4.41: Spektrum a diagram oka na straně přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

4.3.5 Zadání a realizace úlohy v programu PHOTOSS

Sestavte PM-QPSK vysílač a přijímač z modulů v programu PHOTOSS.

Otevřete program PHOTOSS a načtěte soubor „U3 pmqpsk stud.pho“. Zobrazí se přednastavené prostředí s moduly potřebnými k sestavení cvičné úlohy na PM-QPSK vysílač, přenosový kanál a přijímač. Uložte jej přes file save as, jako „U3 pmqpsk stud resene.pho“ (v případě, že soubor již existuje, přepište jej). Nyní můžete začít se spojováním modulů.



Obr. 4.42: PHOTOSS topologie v úloze 3

Postup:

QPSK modulátor X navedte do polarizátoru PC_X. Z něj vyvedte výstup do OscilloscopeX1, EyeAnalyzerX1 a 3dB Coupleru0. Opakujte i pro modulátor v rovině Y. Přenosová cesta je z 3dB Coupleru0 do BlackBoxEDFA0 do SMF do 3dB Coupleru1. Výstup z vlákna (SMF) vyvedte do EyeAnalyzerFE a OscilloscopeFE.

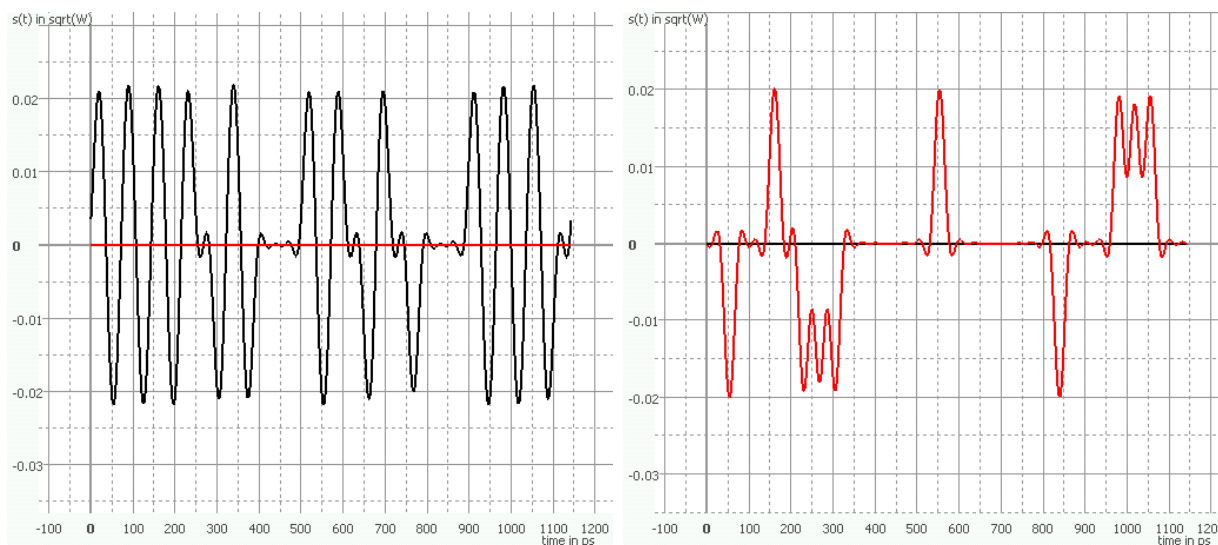
Přijímač v rovině X se skládá z:

- Polarizer_X,
- Coherent QPSK Demodulátor X,
- Laser Oscilátor,
- Phase shifter 12d.

Výstup z Polarizeru_X navedte do demodulátoru a EyeAnalyzerX2. Ujistěte se, že vrchní přípoj do demodulátoru je výstup z polarizéru. Druhý port vyžaduje optický signál z lokálního oscilátoru. Zde je fázově posunut o 12 stupňů. Výstupy z demodulátorů navedte na eyeAnalyzer a osciloskop (celkem 2x2 prvky).

Postup propojení přijímače provedte i pro rovinu Y.

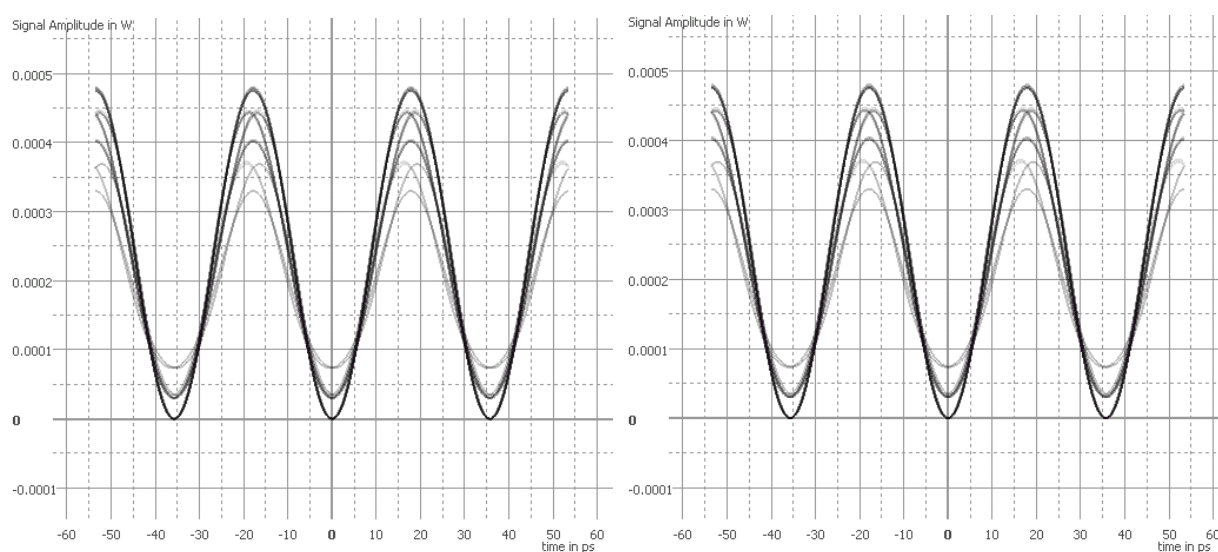
4.3.6 Výsledky PHOTOSS



(a) Průběh signálu oscilloscopeX1

(b) Průběh signálu oscilloscopeY1

Obr. 4.43: Výstup z modulátorů zobrazení na osciloskopu (Zdroj: Vlastní zpracování)



(a) Diagram oka EyeAnalyzerX1

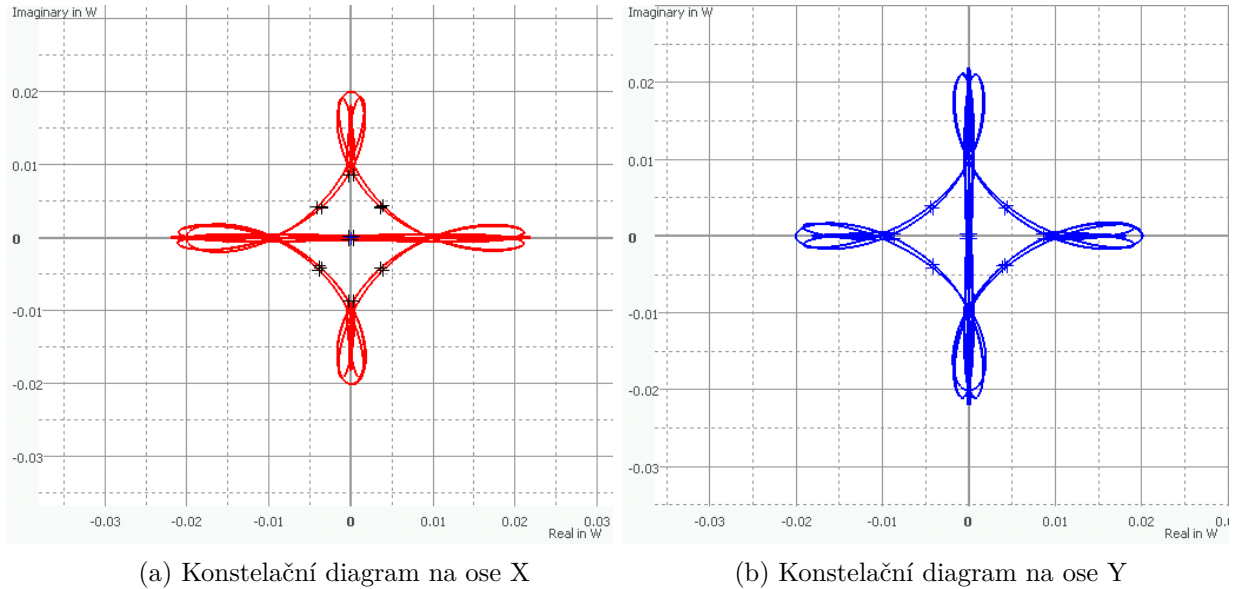
(b) Diagram oka EyeAnalyzerY1

Obr. 4.44: Výstup z modulátorů zobrazení diagram oka před vstupem do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)

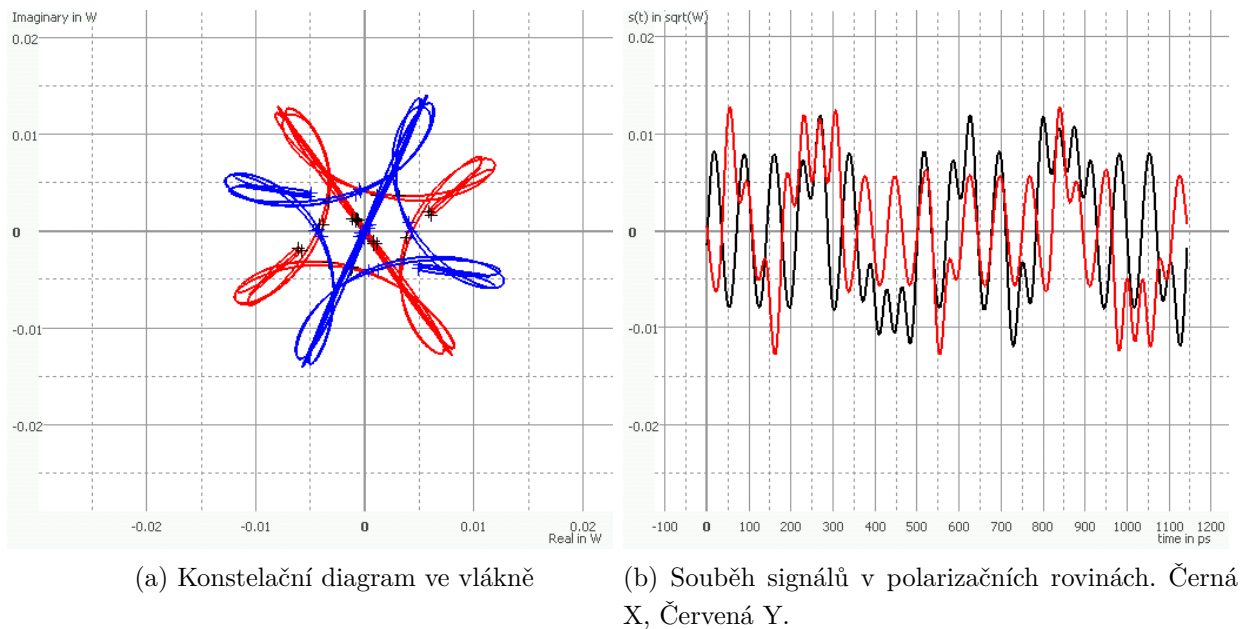
Na obrázcích 4.45 je vidět konstelační diagram po úpravě v přijímači. Odečtené hodnoty z přístrojů:

- EyeAnalyzerX3: $Q_1 = 2,0331$
- Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc\left(\frac{2,0331}{\sqrt{2}}\right) = 0,02102$.
- EyeAnalyzerX4: $Q_1 = 9,5784e^{-1}$

- Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{9,5784e^{-1}}{\sqrt{2}}) = 0,16907$.
- EyeAnalyzerY3: $Q_1 = 1,0112$
- Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{1,0112}{\sqrt{2}}) = 0,15596$.
- EyeAnalyzerY4: $Q_1 = 9,2634e^{-1}$
- Výpočet BER hodnoty: $BER = \frac{1}{2}erfc(\frac{9,2634e^{-1}}{\sqrt{2}}) = 0,17714$.



Obr. 4.45: Konstelační diagramy na vstupu do vlákna (Zdroj: Vlastní zpracování)



Obr. 4.46: Spektrum na konci vlákna a diagram oka na konci přijímače (Zdroj: Vlastní zpracování)

4.3.7 Závěr úlohy

V úloze si student vyzkoušel postavení topologie, ve které se nacházel vysílač a přijímač modulačního formátu PM-QPSK. Student měl zjistit způsob jakým funguje modulace, demodulace se změnou polarizační roviny a případným řešením problémů s tím spojených.

4.3.8 Otázky k úloze

1. Jaký je rozdíl mezi QPSK, DQPSK a QAM?
2. Jakou výhodu má použití klíčovacích metod v přenosu signálu?
3. Co je to koherentní přenos?
4. Z kolika nosných se PM-QPSK signál skládá?
5. Kolika stavové je PM-QPSK?

5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření laboratorních úloh v programech pro simulace optických systémů OptSimTM a PHOTOS. Tyto úlohy měly umožnit studentům pochopit problematiku přenosu dat v lokálních a metropolitních sítích.

Prvním krokem bylo vytvoření teoretické základny práce. Následně jsem se začal obeznámovat se simulačními programy OptSimTM a PHOTOS. Po seznámení se s jednotlivými aplikačními prostředími jsem vytvořil topologii a odzkoušel jednoduchou přístupovou síť. Z důvodu zachování co nejjednodušší topologie byla zvolena trasa bez dalších útlumů a spojek.

Při vytváření simulací jsem zjistil výhody i nevýhody těchto programů. Ty jsem detailně popsal v kapitole Výsledky testovací topologie. Největším rozdílem bylo, že v programu PHOTOS se signál dokázal přenést na výrazně menší vzdálenost než tomu bylo u programu OptSimTM.

Návrhy úloh jsou tvořeny tak, aby se studenti obeznámili s jednotlivými funkcemi návrhů a dokázali je implementovat v simulačních programech. V první úloze student sestaví topologii vysílače a přijímače - přístupovou síť. Tato úloha slouží k vyzkoušení programů, a proto je její obtížnost spíše nižší. Druhou úlohou je rozšíření již vytvořené přístupové sítě do WDM topologie. Úkolem studenta je postavit topologií na dvou daných frekvencích podle návodu. Výsledkem studentského rozšíření je DWDM o osmi kanálech. Třetí úloha se věnuje PM-QPSK. Zde student prostuduje způsob modulace a využití polarizačních rovin v kombinaci s modulací QPSK. V programu PHOTOS je postup řešen jako skládání modulů, přičemž v programu OptSimTM je třeba úlohu postavit celou.

Na základě vytvořených koster a postupů tvoření laboratorních cvičení je možné konstatovat, že cíle práce byly splněny.

Literatura

- [1] FS. The Advantages and Disadvantages of Fiber Optic Transmission. *fs.com* [online]. ©2009-2018 [cit. 2018-09-30]. Dostupné z: <https://www.fs.com/the-advantages-and-disadvantages-of-fiber-optic-transmission-aid-431.html>
- [2] LIGHTREADING. Distributed Feedback (DFB) Lasers *lightreading.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: [https://www.lightreading.com/distributed-feedback-\(dfb\)-lasers/d/d-id/575160](https://www.lightreading.com/distributed-feedback-(dfb)-lasers/d/d-id/575160)
- [3] DAMJANOVSKI, Vlado. *CCTV: networking and digital technology. 2nd ed..* Boston: Elsevier/Butterworth Heinemann, ©2005. ISBN 0750678003.
- [4] LIGHTREADING. PIN vs. APD: Different Sensitivity, Different Applications *lightreading.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://electronics360.globalspec.com/article/10397/pin-vs-apd-different-sensitivity-different-applications>
- [5] FILKA, Miloslav. *Optické přenosy informací pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5064-6.
- [6] G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2017 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.651.1-201811-I/en>
- [7] G.651.1: Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2019 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>
- [8] MTELCOMMUNICATIONS. Měření disperze *mtel.cz* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.mtel.cz/mereni-disperze.php>
- [9] ELECTRONICDESIGN. What's the Difference Between NRZ, NRZI, and Manchester Encoding? *electronicdesign.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-nrz-nrzi-and-manchester-encoding>
- [10] Číž, Radim. *Principy modulací a přenosu sdělovacích signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. ISBN 978-80-214-5117-9.

- [11] KYSELAK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy* [online].[cit. 24. 11. 2018]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=10290
- [12] DOROCIÁK, Petr. *Vliv polarizační disperze na chybovost optického kanálu* [online].[cit. 20. 10. 2018]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5151
- [13] Modulation roundup: error rates, noise, and capacity *Krishna Pillai* [online] [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/print/4017668>
- [14] Coherent WDM Technologies *Infinera* [online] [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.infinera.com/wp-content/uploads/2015/07/Infinera_Coherent_Tech.pdf
- [15] DUFFEK, Luděk. *Modulátor QAM* [online].[cit. 22. 02. 2019]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=4927
- [16] Surveys of Communication Standards by Students: Modulation Techniques [online] [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/UMB/modulate.htm>
- [17] FIBEROPTICSOLUTION. How to Use WDM for Fiber Capacity Expansion? *fiber-optic-solutions.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: <http://www.fiber-optic-solutions.com/use-wdm-fiber-capacity-expansion.html>
- [18] FILKA, Miloslav. *Přenosová média*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [19] ITU. G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/en>
- [20] ITU. G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2012 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>
- [21] LIGHTWAVE. Challenges in Next-Gen PON Deployment *www.lightwaveonline.com* [online] [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.lightwaveonline.com/articles/2017/06/challenges-in-next-gen-pon-deployment.html>

- [22] G.984.3 : Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/en>
- [23] G.989 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989-201510-I/en>
- [24] G.989.1 : 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements *itu.int* [online]. Geneva: ITU-T, 2003 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/en>
- [25] OptSim Product Overview. *Synopsys.com - RSOF*T[online]. Mountain View, CA: Synopsys, ©2018 [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rssoft/system-network-optsim.html>
- [26] FINISAR. APPLICATION NOTES Optical Modes In VCSELs *finisar.com* [online]. ©2018 [cit. 2018-11-03]. Dostupné z: https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/application_note_vcsl_optical_modes.pdf
- [27] P. I. SYSTEMTECHNIK JENS LENGE. Home of PHOTOSS *lenge.de* [online] [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: http://www.lenge.de/english/PHOTOSS_overview.php
- [28] JENS LENGE *User Manual PHOTOSS 5.92*. Bergkamen 2013. 423 s. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <http://www.lenge.de/downloads/PHOTOSS%20User%20Manual.pdf>
- [29] BINH, Le Nguyen. *Optical modulation: advanced techniques and applications in transmission systems and networks*. Boca Raton, [2018]. ISBN 978-1498745239.
- [30] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-29-5.
- [31] OptSim Models Reference: Sample Mode *Synopsys.com - RSOF*T. ©1989 – 2010 RSoft Design Group. [cit. 2019-07-28].

Seznam symbolů, veličin a zkratek

AES	Standard pokročilého šifrování (z angl. Advanced Encryption Standard)
AON	Aktivní optická síť (z angl. Active Optical Network)
APD	Lavinová fotodioda (z angl. Avalanche Photo Diode)
API	Rozhraní pro programování (z angl. Application Programming Interface)
ATM	Asynchronní přenos (z angl. Asynchronous Transfer Mode)
BER	Poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů (z angl. Bit Error Rate)
BPON	Širokopásmová pasivní optická síť (z angl. Broadband Passive Optical Network)
BPSK	Dvoustavové fázové klíčování (z angl. Binary Phase Shift Keying)
CATV	Kabelová televize (z angl. Cable television)
CDMA	Vícenásobný přístup s kódovým dělením (z angl. Code Division Multiple Access)
CW	Kontinuální paprsek (z angl. Continuous Wave)
CWDM	Hrubé vlnové dělení (z angl. Coarse Wavelength Division Multiplex)
DPSK	Klíčování rozdílovým posuvem fáze (z angl. Differential Phase Shift Keying)
DWDM	„Hustý“ vlnový multiplex (z angl. Dense Wavelength Division Multiplex)
DFB	Distribuovaná zpětná vazba (z angl. Distributed feedback)
DGD	Diferenční skupinové spoždění (z angl. Differential group delay)
EDFA	Erbium dopovaný vláknový zesilovač (z angl. Erbium Doped Fiber Amplifier)
EDC	Kompenzace elektronické disperze (z angl. Electronic Dispersion Compensation)
FEC	Dopředné potlačení chyb (z angl. Forward Error Control)
FP	Fabry-Perot
FSO	Bezdrátové optické spoje (z angl. Free Space Optics)
FTTH	Vlákno až do domu, bytu (z angl. Fiber-to-the-home)
FTTO	Vlákno až do kanceláře (z angl. Fiber-to-the-office)
FTTx	Generická zkratka architektury sítě vyjadřující konec optického vlákna (z angl. Fiber-to-the-x)
GEM	GPON zapouzdřovací metoda (z angl. GPON Encapsulation Method)
GPON	Gigabitová pasivní optická síť (z angl. Gigabitcapable Passive Optical Network)

GTC	GPON přenosová konvergence (z angl. GPON Transmission Convergence)
iFoG	Interferometrický optický gyroskop (z angl. Interferometric Fiber Optic Gyroscope)
IP	Internetový protokol na třetí vrstvě ISO/OSI (z angl. Internet Protocol)
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie (z angl. International Telecommunication Union)
LAN	Lokální síť (z angl. Local Area Network)
LED	Světlo vyzařující dioda (z angl. Light Emitting Diode)
MAN	Propoj na úrovni metropole/města (z angl. Metropolitan Area Network)
MMF	Vícevidový typ vlákna (z angl. Multimode Fiber)
NG-PON	Pasivní optická síť příští generace (z angl. Next-Generation Passive Optical Network)
NRZ	Linkový kód bez návratu k nule (z angl. Non-return to zero)
OCDMA	Optický vícenásobný přístup s kódovým dělením (z angl. Optical Code Division Multiple Access)
ODN	Optická distribuční síť (z angl. Optical Distribution Network)
OLT	Optické linkové zakončení (z angl. Optical Line Termination)
ONT	Koncový terminál uživatele (z angl. Optical Network Termination)
ONU	Optická síťová jednotka (z angl. Optical Network Unit)
OTDM	Optický časový multiplex (z angl. Optical Time Division Multiplexing)
P2M	Mnohabodové připojení, rozvětvení (z angl. Point-to-Multipoint)
P2P	Spojení bod-bod (z angl. Point-to-Point)
PCB	Fyzický řídicí blok (z angl. Physical control block)
PIN	Základní typ polovodičové fotodiody s intrinickou regulací
PMD	Polarizační vidová disperze (z angl. Polarisation Mode Dispersion)
PON	Pasivní optická síť (z angl. Passive Optical Network)
PSK	Fázové klíčování (z angl. Phase-shift keying)
RF	Rádiová frekvence (z angl. Radio frequency)
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace (z angl. Quadrature Amplitude Modulation)
QPSK	Kvadrurní klíčování fázovým posuvem (z angl. Quadrature phase-shift keying)
SDH	Synchronní Digitální Hierarchie
SMF	Jednovidový typ vlákna (z angl. Singlemode Fiber)
SNR	Poměr signálu k šumu (z angl. signal noise ratio)

TDM	Časový multiplex (z angl. Time Division Multiplex)
TDMA	Vícenásobný přístup s časovým dělením (z angl. Time Division Multiple Access)
VCSEL	Plošně vyzařující laser (z angl. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers)
WAN	Propojení rozsáhlejšího území (z angl. Wide Area Network)
WDM	Vlnový multiplex (z angl. Wavelength Division Multiplexing)
Wi-Fi	Bezdrátové spojení
WWDM	Široký vlnový multiplex (z angl. Wide Wavelength Division Multiplex)
XG-PON	10-gigabitová pasivní optická síť (z angl. 10-Gigabit-capable Passive Optical Network)

Seznam příloh

A Obsah přiloženého CD

100

A Obsah přiloženého CD

Obsahem přiloženého CD je dokument této práce a jednotlivá cvičení rozřazené do složek.

/	kořenový adresář přiloženého CD
└─ U1 Opt	adresář úlohy 1 OptSim
└─ stud1.moml	úloha 1 OptSim
└─ U1 PHO	adresář úlohy 1 PHOTOSS
└─ stud1.moml	úloha 2 PHOTOSS
└─ U2 WDM OPT	adresář úlohy 2 OptSim
└─ U2wdm.moml	úloha 2 OptSim
└─ U2wdmfinal.moml	řešená úloha 2 OptSim
└─ U2 WDM PHO	adresář úlohy 2 PHOTOSS
└─ U2 wdm	
└─ U2 wdm.pho	řešená uloha WDM 2
└─ U2 wdm vychozi.pho	výchozí soubor pro úlohu 2
└─ U2wdm stud	adresář úlohy 2 studentské rozšíření
└─ u2wdmstud.pho	řešená úloha 2 studentské rozsireni
└─ U3 pmqpsk OPT	adresář úlohy 3 OptSim
└─ U3PMQPSK.moml	řešená úloha 3 OptSim
└─ U3 pmqps PHO	adresář úlohy 3 PHOTOSS
└─ U3 pmqpsk stud.pho	výchozí soubor pro úlohu 3 PHOTOSS
└─ U3 pmqpsk stud resene.pho	řešená úloha 3 PHOTOSS
└─ xchalo13DP.pdf	Diplomová práce text